

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему: «Автономний цифровий годинник з GPS-синхронізацією часу»

Виконав:

студент IV курсу, групи ДП-21

Дзюба Гліб Борисович _____

Керівник: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н.,

доц. Бовтун Віктор Петрович _____

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,

Свєчніков Георгій Сергійович _____

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Діденко Юрій Вікторович _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет Електроніки

Кафедра Мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка

Освітньо-професійна програма – Мікро- та наноелектроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дмитро Дмитрович Татарчук

«_____» _____ 2026 p.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Дзюбі Глібу Борисовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Автономний цифровий годинник з GPS-синхронізацією часу
керівник проєкту доцент кафедри МЕ, к.ф.-м.н., доцент Віктор Петрович Бовтун
затверджені наказом по університету від «___» _____ 2026 р. №_____
2. Термін подання студентом роботи «__» _____ 2026 року
3. Вихідні дані до роботи: характеристики GPS-модуля, мікроконтролера та системи живлення; алгоритми обробки і відображення часу; результати тестування автономного GPS-годинника.
4. Зміст пояснювальної записки: аналіз GPS-синхронізації часу, розробка автономного GPS-годинника, налаштування та програмування пристрою, тестування і дослідження роботи системи.
5. Перелік графічного матеріалу: структурна та принципова схеми пристрою, блок-схема алгоритму роботи, фотографія готового GPS-годинника.
6. Дата видачі завдання:

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання технічного завдання, аналіз літературних джерел та огляд існуючих аналогів.	12.03.2026 - 25.03.2026	
2	Обґрунтування вибору елементної бази (мікроконтролер, приймач супутникової навігації, підсистема живлення).	26.03.2026 - 30.03.2026	
3	Розробка структурної та апаратної принципової електричної схеми пристрою	01.04.2026 - 08.04.2026	
4	Проектування топології та трасування друкованої плати (РСВ) у середовищі САПР.	09.04.2026 - 13.04.2026	
5	Розробка математичної моделі, алгоритмів роботи та написання програмного забезпечення.	13.04.2026 - 04.05.2026	
6	Віртуальне моделювання роботи системи та налагодження програмного коду.	05.05.2026 - 11.05.2026	
7	Проведення експериментальних досліджень (оцінка точності, вимірювання похибок, розрахунок енергоспоживання).	11.05.2026 - 18.05.2026	
8	Написання, форматування та оформлення пояснювальної записки згідно з вимогами ДСТУ.	19.05.2026 - 25.05.2026	

Студент

_____ Гліб ДЗЮБА,
(підпис)

Керівник роботи

_____ Віктор БОВТУН.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 85 с. , 14 рис. , 6 табл. , 1 дод. , 20 джерел.

Об'єкт дослідження: процес апаратно-програмної синхронізації часу та оптимізації енергоспоживання в автономних мікроконтролерних системах.

Предмет дослідження: схемотехнічні та алгоритмічні рішення для побудови автономного годинника на базі мікроконтролера з використанням GPS-приймача та підсистеми інтелектуального керування живленням.

Мета роботи: розробка та дослідження апаратно-програмного комплексу автономного годинника із синхронізацією часу за даними системи GPS, оптимізованим енергоспоживанням та інтерфейсом зовнішнього моніторингу.

Методи дослідження: методи теорії електричних кіл для розрахунку параметрів підсистеми живлення, методи комп'ютерного моделювання (симуляція у середовищі Proteus) для перевірки працездатності алгоритмів, САПР KiCad для проектування апаратної частини, а також експериментальні методи для оцінки енергоспоживання розробленого пристрою.

Результат роботи: створено повноцінний проект (принципова схема, трасування плати, програмний код) енергоефективного автономного годинника. Запропонована архітектура з транзисторним керуванням живленням GPS-модуля (Low-Side Switch) та комунікаційним UART-інтерфейсом для моніторингу телеметрії. Реалізовано програмний годинник (RTC) на неблокуючих алгоритмах та алгоритм автоматичного розрахунку часового поясу на основі географічної довготи.

Ключові слова: автономний годинник, GPS-синхронізація, мікроконтролер, ATmega168P, енергозбереження, NMEA 0183, Proteus, KiCad.

ANNOTATION

Qualification work: 85 p., 14 fig., 6 tabl., 1 app., 20 sources.

Object of research: the process of hardware-software time synchronization and power consumption optimization in autonomous microcontroller systems.

Subject of research: circuit and algorithmic solutions for building an autonomous clock based on a microcontroller using a GPS receiver and an intelligent power management subsystem.

Goal of the work: development and research of an autonomous clock hardware-software complex with time synchronization via GPS data, optimized power consumption, and an external monitoring interface.

Research methods: circuit theory methods for power subsystem calculations, computer simulation methods (Proteus environment) for algorithm verification, KiCad CAD for hardware design, and experimental methods for power consumption assessment of the developed device.

Results of the work: a complete design (schematic diagram, PCB routing, source code) of an energy-efficient autonomous clock has been created. An architecture featuring a low-side transistor switch for GPS power management and a UART interface for telemetry monitoring has been proposed. A software-based Real-Time Clock (RTC) using non-blocking algorithms and an automatic time zone calculation method based on geographical longitude have been implemented.

Keywords: autonomous clock, GPS synchronization, microcontroller, ATmega168P, energy saving, NMEA 0183, Proteus, KiCad.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ АВТОНОМНИХ ГОДИННИКІВ	11
1.1 Огляд існуючих систем відліку точного часу та методів їх синхронізації .	11
1.2. Принцип побудови та функціонування глобальної системи позиціонування (GPS) для отримання часових міток	16
1.3. Специфікація та аналіз протоколу NMEA 0183 для передачі навігаційних і часових даних	19
1.4. Особливості проектування автономних електронних пристроїв та методи зниження їх енергоспоживання	28
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	32
РОЗДІЛ 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЮ	34
2.1. Структурна схема автономного годинника з GPS	34
2.2. Схемотехнічна реалізація підсистеми керування та індикації	35
2.3. Проектування підсистеми енергозбереження та моніторингу телеметрії .	36
2.4. Схемотехнічна реалізація підсистеми живлення та заряду	38
2.5. Математичний розрахунок параметрів підсистеми живлення та вимірювання	40
2.5.1. Розрахунок параметрів підвищуючого перетворювача напруги MT3608	41
2.5.2. Розрахунок режиму заряду та теплового балансу контролера TP4056.	42
2.5.3. Розрахунок вимірювального кола (дільника напруги) для АЦП	44
2.6. Розробка загальної принципової електричної схеми	45
2.7. Проектування друкованої плати та топологія трасування.....	46
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	49
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ.....	51
3.1. Структура програмного забезпечення та загальний алгоритм роботи.....	51

3.2. Реалізація внутрішнього годинника (RTC) та керування енергозбереженням	53
3.3. Обробка навігаційних даних та автоматичне обчислення часового поясу	54
3.4. Вимірювання рівня заряду та формування телеметричних даних.....	55
3.5. Алгоритмічна реалізація кооперативної багатозадачності та математичної моделі програмного RTC.....	55
3.5.1. Математична модель каскадного інкрементування часу.....	56
3.5.2. Алгоритм динамічного зсуву часу та часових поясів	57
3.6. Симуляція роботи пристрою у середовищі Proteus	59
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	61
4.1. Дослідження енергоспоживання пристрою в різних режимах роботи.....	63
4.2. Розрахунок часу автономної роботи від акумулятора 18650	66
4.3. Оцінка часу «холодного» та «гарячого» старту GPS-модуля.....	68
4.4. Аналіз похибки та точності ходу годинника в умовах втрати GPS-сигналу	69
4.5. Аналіз точності вимірювання напруги та профілю розряду акумулятора.	71
4.5.1. Аналіз інструментальної похибки дільника напруги та АЦП	72
4.5.2. Дослідження нелінійності розрядного профілю Li-ion акумулятора....	73
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	74
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	78
Додаток А. Принципова схема.....	82
Додаток В. Вигляд друкованої плати в 3D	83
Додаток Г. Результати моделювання роботи пристрою в середовищі Proteus...	84
Додаток Ґ. Перелік компонентів.....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

МК - мікроконтролер

САПР - система автоматизованого проєктування

CC/CV (Constant Current / Constant Voltage) - заряд постійним струмом / постійною напругою

DC-DC (Direct Current to Direct Current) - імпульсний перетворювач постійного струму

DGPS (Differential Global Positioning System) - диференційна система глобального позиціонування

DOP (Dilution of Precision) - фактор погіршення точності

GNSS (Global Navigation Satellite System) - глобальна навігаційна супутникова система

GPS (Global Positioning System) - глобальна система позиціонування

HDOP (Horizontal Dilution of Precision) - горизонтальний фактор зниження точності

NMEA (National Marine Electronics Association) - Національна асоціація морської електроніки, стандарт комунікації

NTP (Network Time Protocol) - протокол мережевого часу

PCB (Printed Circuit Board) - друкована плата SNR (Signal-to-Noise Ratio) - відношення сигнал/шум

SNTP (Simple Network Time Protocol) - простий протокол мережевого часу

SPS (Standard Positioning Service) - стандартна система позиціонування

TAI (Temps Atomique International) - Міжнародний атомний час

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) - універсальний асинхронний приймач-передавач

UTC (Coordinated Universal Time) - Всесвітній координований час

ВСТУП

У сучасному світі точний час є критично важливим параметром для функціонування багатьох електронних систем: від систем автоматизації та реєстраторів даних до портативної електроніки. Традиційні мікросхеми годинників реального часу (RTC) забезпечують прийнятну точність в автономному режимі, проте з часом неминуче накопичують похибку через температурний дрейф та старіння кварцових резонаторів.

Для вирішення цієї проблеми ефективним підходом є періодична синхронізація локального часу із зовнішнім еталонним джерелом. Використання глобальної системи позиціонування (GPS) для отримання точних часових міток дозволяє досягти атомної точності часу незалежно від наявності підключення до мережі Інтернет. Однак, інтеграція GPS-модулів у портативні пристрої породжує нову проблему - високе енергоспоживання приймача, що суттєво обмежує час автономної роботи від акумулятора.

Розробка апаратно-програмних рішень, які поєднують високу точність GPS-синхронізації з алгоритмами енергозбереження (зокрема, апаратним керуванням живленням модулів) та можливістю зовнішнього моніторингу телеметрії, є актуальним інженерним завданням.

Мета роботи полягає у розробці та дослідженні апаратно-програмного комплексу автономного годинника із синхронізацією часу за даними системи GPS, оптимізованим енергоспоживанням та інтерфейсом зовнішнього моніторингу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи синхронізації часу та особливості побудови автономних електронних пристроїв.
2. Обґрунтувати вибір елементної бази та розробити принципову електричну схему пристрою із підсистемою керування живленням GPS-приймача.

3. Спроекувати топологію друкованої плати (PCB) та підготувати пристрій до апаратної реалізації.

4. Розробити програмне забезпечення для мікроконтролера, що реалізує парсинг навігаційних даних (NMEA), виведення інформації на дисплей та передачу телеметричних даних (час, дата, заряд акумулятора) через інтерфейс UART.

5. Провести симуляцію роботи схеми та експериментально дослідити енергоспоживання пристрою в різних режимах роботи.

Об'єкт дослідження: процес апаратно-програмної синхронізації часу та оптимізації енергоспоживання в автономних мікроконтролерних системах.

Предмет дослідження: схемотехнічні та алгоритмічні рішення для побудови автономного годинника на базі мікроконтролера з використанням GPS-приймача та підсистеми інтелектуального керування живленням.

Методи дослідження. При виконанні роботи використано методи теорії електричних кіл для розрахунку параметрів підсистеми живлення, методи комп'ютерного моделювання (симуляція у середовищі Proteus) для перевірки працездатності алгоритмів, САПР KiCad для проектування апаратної частини, а також експериментальні методи для оцінки енергоспоживання розробленого пристрою.

Практичне значення отриманих результатів. Створено повноцінний проект (принципова схема, трасування плати, програмний код) енергоефективного автономного годинника. Запропонована архітектура з транзисторним керуванням живленням GPS-модуля та комунікаційним UART-інтерфейсом може бути використана як базовий модуль у системах реєстрації даних (dataloggers), системах розумного дому або як самостійний портативний пристрій.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ АВТОНОМНИХ ГОДИННИКІВ

1.1 Огляд існуючих систем відліку точного часу та методів їх синхронізації

Проблема точного відліку та синхронізації часу є однією з фундаментальних у галузі інформаційних технологій, мікроелектроніки та телекомунікацій. Розвиток систем зв'язку, розподілених обчислювальних мереж, автоматизованих систем керування та систем реєстрації даних висуває дедалі жорсткіші вимоги до точності шкали часу, що генерується всередині кінцевих пристроїв.

В основі сучасного літочислення та синхронізації лежить концепція Всесвітнього координованого часу (UTC - Coordinated Universal Time). На відміну від застарілих астрономічних стандартів, які базувалися на періоді обертання Землі навколо своєї осі, UTC спирається на Міжнародний атомний час (TAI - Temps Atomique International). Шкала TAI формується на основі консолідованих даних сотень високоточних цезієвих та водневих стандартів частоти (атомних годинників), розташованих у провідних метрологічних лабораторіях світу. Оскільки швидкість обертання Землі є нестабільною і поступово сповільнюється під дією припливних сил, для утримання шкали UTC у межах 0,9 секунди відносно астрономічного часу (UT1) до UTC періодично додається або віднімається так звана «секунда координації» (leap second).

При проектуванні локальних цифрових систем, що виконують функцію годинника, інженери стикаються з проблемою вибору первинного джерела часових міток. Залежно від умов експлуатації, архітектури пристрою та вимог до точності, сучасні методи відліку та синхронізації часу можна класифікувати на три основні групи:

1. Автономний апаратний відлік на базі спеціалізованих мікросхем годинників реального часу (RTC - Real-Time Clock).

2. Мережева синхронізація за допомогою протоколів передачі даних (NTP/SNTP).
3. Супутникова синхронізація за допомогою сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS: GPS, GLONASS, Galileo).

Розглянемо детально технічні особливості, переваги та обмеження кожного з цих підходів.

Апаратний метод відліку часу за допомогою інтегральних мікросхем RTC є найбільш поширеним у побутовій та промисловій електроніці. Типовий модуль RTC (наприклад, класичні мікросхеми DS1307 або DS3231) є спеціалізованим цифровим лічильником, що тактується від кварцового резонатора з номінальною частотою 32768 Гц. Ця частота обрана не випадково: значення $32768 = 2^{15}$, що дозволяє реалізувати простий 15-розрядний двійковий лічильник-дільник для отримання секундних імпульсів з мінімальними апаратними витратами. Мікросхеми RTC мають власну систему живлення (від літієвого елемента CR2032 або суперконденсатора), що забезпечує безперервний хід лічильників навіть при повному вимкненні основного пристрою.

Проте автономні RTC мають суттєвий недолік - низьку довгострокову стабільність частоти, зумовлену властивостями самого кварцового резонатора. Основними факторами, що викликають деградацію точності (дрейф часу), є:

- Температурна нестабільність: резонансна частота звичайного годинникового кварцу має параболічну залежність від температури з вершиною поблизу кімнатної температури (+25 °C). При відхиленні температури в будь-який бік частота зменшується, що призводить до відставання годинника.
- Старіння кварцу: з часом фізичні властивості кварцової пластини змінюються (через дифузію матеріалу електродів, мікротріщини), що викликає необоротний зсув резонансної частоти.
- Похибка монтажу та паразитні ємності: ємність друкованих провідників, що з'єднують мікросхему з кварцом, впливає на частоту генерації.

Для компенсації цих ефектів використовуються дорожчі мікросхеми класу TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator), такі як DS3231. У їхній кристал інтегровано цифровий датчик температури та масив підлаштовувальних конденсаторів. Мікросхема періодично вимірює температуру навколишнього середовища і за допомогою вбудованої таблиці відповідності коригує ємність навантаження кварцу, утримуючи частоту стабільною. Це дозволяє знизити похибку до ± 2 проміле (ppm) у широкому температурному діапазоні (від -40 °C до $+85$ °C), що еквівалентно похибці близько ± 1 хвилини на рік. Тим не менш, навіть TCXO-модулі з часом накопичують абсолютну похибку, яка через кілька років експлуатації стає критичною для систем точного моніторингу.

Мережевий метод синхронізації базується на використанні протоколу мережевого часу (NTP - Network Time Protocol) або його спрощеної версії (SNTP - Simple Network Time Protocol). Цей метод є стандартом де-факто для комп'ютерних систем, серверного обладнання та пристроїв інтернету речей (IoT), що мають постійний доступ до локальної мережі або інтернету. Синхронізація відбувається шляхом обміну UDP-пакетами між клієнтським пристроєм та ієрархічною мережею NTP-серверів. Рівень сервера в ієрархії позначається як Stratum:

- Stratum 0: первинні фізичні джерела точного часу (атомні годинники, GPS-приймачі лабораторного рівня), які безпосередньо не підключені до мережі.
- Stratum 1: сервери, які безпосередньо підключені до пристроїв Stratum 0 і є основними постачальниками часу в мережі.
- Stratum 2: сервери, які отримують час від серверів Stratum 1 через мережеві з'єднання, і так далі.

Алгоритм NTP є досить складним і враховує затримку поширення сигналу в комп'ютерних мережах. Клієнт надсилає запит, фіксуючи час відправлення за своїм локальним годинником, а сервер, отримавши пакет, додає мітку часу прийому та мітку часу відправлення відповіді. Після отримання відповіді клієнт

вираховує кругову затримку мережі (round-trip delay) та зміщення свого годинника за формулами:

$$\tau = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2) \quad (1.1)$$

$$\theta = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} \quad (1.2)$$

де T_1 - час відправлення запиту клієнтом, T_2 - час прийому запиту сервером, T_3 - час відправлення відповіді сервером, T_4 - час прийому відповіді клієнтом.

Незважаючи на високу точність (у межах кількох мілісекунд у глобальних мережах та мікросекунд у локальних мережах за умови використання протоколу RTP), методи NTP/SNTP мають фундаментальне обмеження: пристрій повинен мати складний та енергоємний мережевий інтерфейс (Ethernet, Wi-Fi, GSM-модем) та перебувати в зоні покриття мережі. Для повністю автономних портативних пристроїв, що працюють у польових умовах, цей метод є непридатним через надмірне споживання енергії мережевими трансиверами (струми споживання Wi-Fi модулів під час передачі досягають 100–200 мА).

Супутникова синхронізація за допомогою систем GNSS (зокрема, американської системи NAVSTAR GPS) позбавлена обмежень апаратних RTC та мережевих протоколів. Космічний сегмент системи GPS складається щонайменше з 24 діючих супутників, розташованих на шести кругових навколоземних орбітах на висоті близько 20200 км. На борту кожного супутника встановлено кілька високостабільних квантових (рубідієвих або цезієвих) стандартів частоти. Супутники безперервно транслюють складні фазомодовані навігаційні сигнали, які містять точні параметри орбіт (альманах та ефемериди) та поточний час генерації сигналу з атомною точністю.

Головною перевагою використання GPS для синхронізації часу є повна автономність від наземних мереж зв'язку та абсолютна точність: похибка отримання часової мітки за допомогою навіть бюджетного комерційного GPS-

приймача не перевищує кількох десятків наносекунд відносно шкали UTC. Пристрій може успішно синхронізуватися в будь-якій точці земної кулі під відкритим небом. Порівняльний аналіз розглянутих методів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз методів синхронізації часу

Параметр порівняння	Апаратний RTC (на прикладі DS3231)	Мережевий протокол (NTP / SNTP)	Супутниковий інтерфейс (GPS / GNSS)
Абсолютна точність	Низька (накопичує похибку до 1 хв/рік)	Висока (похибка 1–50 мс залежно від мережі)	Еталонна (похибка < 1 мкс відносно UTC)
Залежність від зовнішньої інфраструктури	Повністю відсутня (автономна робота)	Критична (необхідна точка доступу, інтернет)	Часткова (необхідна пряма видимість супутників)
Енергоспоживання підсистеми	Мізерне (одиниці мікроампер, 1–3 мкА)	Високе (100–250 мА під час активного з'єднання)	Середнє/Високе (35–60 мА в режимі пошуку/активного прийому)
Складність програмної реалізації	Низька (читання регістрів шині I2C)	Висока (реалізація TCP/IP стеку та UDP клієнта)	Середня (парсинг текстових рядків протоколу NMEA)
Вартість апаратних компонентів	Мінімальна	Середня (вартість Wi-Fi / GSM мікросхем)	Середня (вартість спеціалізованого GPS модуля)

Аналіз таблиці 1.1 чітко вказує на те, що для побудови точного автономного годинника, який повинен надійно працювати поза межами дії телекомунікаційних мереж, оптимальним рішенням є комбінація супутникового методу (як джерела абсолютного часу) та апаратного мікроконтролерного відліку. Проте, зважаючи на відносно високий струм споживання GPS-приймача, критично важливою інженерною задачею є впровадження схемотехнічних рішень для динамічного керування його живленням.

1.2. Принцип побудови та функціонування глобальної системи позиціонування (GPS) для отримання часових міток

Для коректного проектування радіоелектронного пристрою, що використовує супутникові дані, необхідно детально дослідити фізичні та математичні принципи, на яких базується робота системи GPS (Global Positioning System). Хоча першочерговим завданням системи є тривимірне позиціонування об'єктів у просторі (визначення широти, довготи та висоти), координати та час у GNSS є нерозривно пов'язаними величинами.

Робота системи базується на методі беззапитових далекомірних вимірювань, який математично зводиться до задачі трилатерації. Користувач, який має GPS-приймач, пасивно приймає радіосигнали від супутників, що перебувають у зоні прямої видимості. Оскільки швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі та повітрі є постійною величиною і дорівнює швидкості світла ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с), відстань D_i від приймача до i -го супутника можна визначити, вимірявши час t_{tr} проходження сигналу від антени супутника до антени приймача:

$$D_i = c \cdot t_{tr} = c \cdot (t_{rcv} - T_{x,i}) \quad (1.3)$$

де t_{rcv} - час прийому сигналу за локальним годинником пристрою, $T_{x,i}$ - точний час випромінювання сигналу, закодований у структурі радіохвилі супутника.

З геометричної точки зору, знаючи точні координати супутника (X_i, Y_i, Z_i) , отримані з ефемеридних даних, та відстань D_i , можна стверджувати, що приймач розташований на поверхні сфери радіуса D_i з центром у точці розташування супутника. Перетин двох таких сфер утворює коло, перетин трьох сфер дає дві точки у просторі (одна з яких зазвичай відсікається як помилкова, оскільки лежить глибоко всередині Землі або в космосі[2]).

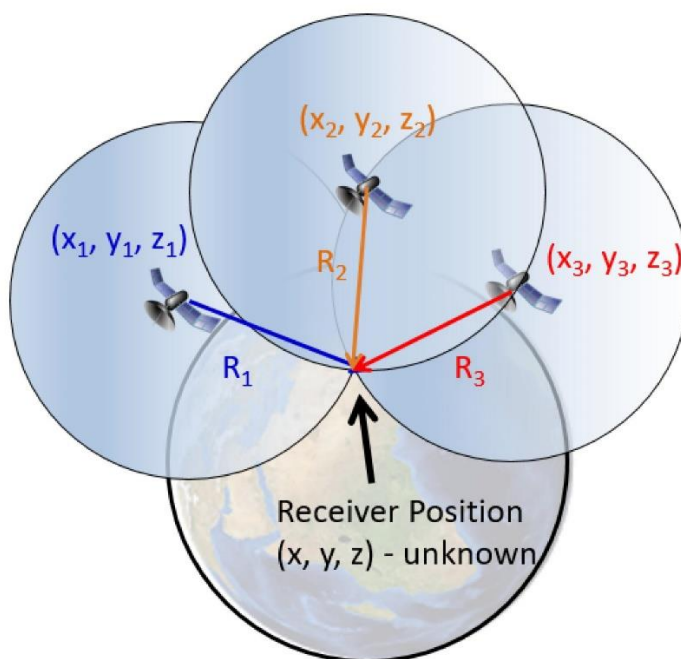


Рисунок 1.1 – Ілюстрація принципу GPS-трилатерації та визначення координат користувача[2]

Таким чином, теоретично для визначення тривимірних координат достатньо мати сигнали від трьох космічних апаратів.

Проте на практиці виникає серйозна математична та апаратна перешкода. Бортові годинники супутників є атомними і синхронізовані між собою з високою точністю, тоді як локальний годинник бюджетного приймача (вбудований

кварцовий генератор мікроконтролера або спеціалізованого чіпа) має суттєву похибку зсуву часу Δt . Через це виміряна відстань відрізняється від реальної геометричної відстані й називається псевдовідстанню (R_i). Математична модель вимірювання псевдовідстані має вигляд:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} + c \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

де (x, y, z) - невідомі координати користувача, які необхідно знайти, а Δt - невідомий зсув шкали часу приймача відносно системного часу GPS.

Оскільки у рівнянні є чотири невідомі величини $(x, y, z, \Delta t)$, система стає визначеною лише тоді, коли кількість рівнянь дорівнює або перевищує кількість невідомих. Саме тому для успішного визначення координат та точного часу всередині GPS-модуля необхідно одночасно приймати сигнали щонайменше від чотирьох супутників. В результаті розв'язання цієї системи нелінійних алгебраїчних рівнянь обчислювальний процесор GPS-приймача знаходить точні просторові координати пристрою та величину Δt , що дозволяє миттєво скоригувати внутрішній локальний годинник приймача, підлаштувавши його під атомний еталон.

Важливим фактором, який досліджується в дипломній роботі, є геометричне розташування супутників на небосхилі, яке описується фактором погіршення точності (DOP - Dilution of Precision). Для задач точної хронометрії критичним є параметр TDOP (Time Dilution of Precision) - коефіцієнт погіршення точності за часовою координатою. Якщо супутники розташовані близько один до одного, математична матриця рівнянь стає погано обумовленою, і похибка обчислення Δt зростає. Якщо ж супутники рівномірно розподілені по небосхилу, значення TDOP наближається до одиниці, що забезпечує мінімальну похибку отримання часу.

Також слід зазначити, що системний час GPS (GPS Time) не є повністю ідентичним цивільній шкалі UTC. На відміну від UTC, у системному часі GPS

немає секунд координатії (скачків). Шкали збігалися на момент запуску системи у січні 1980 року. Через накопичення секунд координатії, станом на поточний момент часу шкала GPS випереджає шкалу UTC на фіксовану цілу кількість секунд (наразі ця різниця становить 18 секунд). Обчислювальний процесор супутникового модуля автоматично зчитує з навігаційного повідомлення супутників поточні параметри іоносферної корекції та актуальний зсув секунд координатії, самостійно здійснюючи перерахунок системного часу у формат цивільного часу UTC перед виведенням даних у користувацькі інтерфейси.

1.3. Специфікація та аналіз протоколу NMEA 0183 для передачі навігаційних і часових даних

Після того як GPS-приймач (наприклад, u-blox NEO-6M) успішно прийняв радіосигнали, розв'язав навігаційну задачу та визначив точний час, ці дані необхідно передати на керуючий мікроконтролер пристрою. Стандартом для обміну даними між морським та навігаційним електронним обладнанням є протокол NMEA 0183, розроблений Національною асоціацією морської електроніки США (National Marine Electronics Association).

З фізичної точки зору, передача даних у протоколі NMEA 0183 реалізується через асинхронний послідовний інтерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Для більшості комерційних модулів параметрами зв'язку за замовчуванням є:

- Швидкість передачі (Baud Rate): 9600 бод (біт/с).
- Кількість бітів даних: 8.
- Паритет (біт парності): відсутній (None).
- Кількість стоп-бітів: 1.

Протокол NMEA 0183 є текстовим (ASCII), тобто всі дані передаються у вигляді зрозумілих людині рядків, що значно спрощує процес відлагодження системи, але вимагає від керуючого мікроконтролера додаткових

обчислювальних ресурсів для парсингу (синтаксичного аналізу) текстових рядків та їх конвертації у числові змінні.

Кожне NMEA-повідомлення називається "реченням" (sentence). Структура типового речення підпорядковується суворим синтаксичним правилам[5]:

1. Початок речення завжди маркується символом долара \$ (ASCII 0x24).
2. Наступні два символи визначають тип джерела даних (Talker ID). Для систем GPS використовуються символи GP, для комбінованих приймачів ГЛОНАСС/GPS - GN або GL.
3. Наступні три символи визначають тип речення (типи даних, що містяться всередині). Наприклад: RMC, GGA, GLL, ZDA.
4. Далі йдуть інформаційні поля, відокремлені один від одного комою , (ASCII 0x2C). Якщо якесь поле є порожнім (наприклад, за відсутності зв'язку з супутниками координати не визначені), коми все одно ставляться послідовно одна за одною.
5. Наприкінці інформаційного блоку ставиться символ зірочки * (ASCII 0x2A), який є роздільником між даними та контрольною сумою.
6. Після зірочки йдуть два шістнадцяткові символи, що представляють контрольну суму (Checksum). Контрольна сума обчислюється як результат порозрядного виключного «АБО» (XOR) для кодів усіх символів речення, розташованих між символами \$ та * (самі символи \$ та * в обчислення не включаються).
7. Завершується кожне речення обов'язковою послідовністю символів повернення каретки \r (CR, ASCII 0xD) та переведення рядка \n (LF, ASCII 0xA).

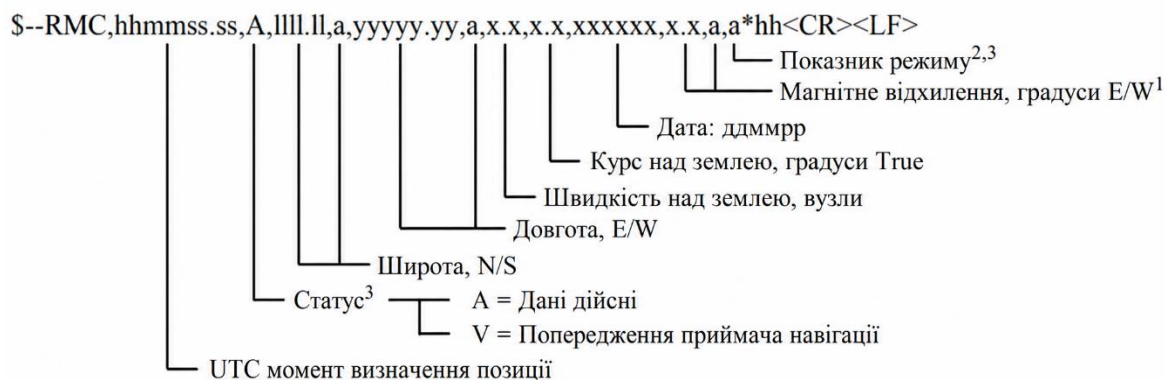


Рисунок 1.2 – Структура NMEA-повідомлення типу \$GPRMC та призначення його інформаційних полів[5]

Для задач проєктування автономного годинника найбільш інформативними є три типи речень: \$GPRMC (Recommended Minimum Specific GNSS Data), \$GPGGA (Global Positioning System Fix Data) та \$GPZDA (Time & Date).

Розглянемо структуру речення \$GPRMC, яке є базовим для більшості систем хронометрії, оскільки містить мінімально необхідний збалансований набір даних про час, дату та валідність супутникового з'єднання. Типовий вигляд рядка \$GPRMC:

\$GPRMC,123519.00,A,4827.81023,N,03019.24518,E,0.022,,230526,,,A*75

Детальний покомпонентний аналіз структури цього повідомлення наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Декодування полів NMEA речення \$GPRMC

Номер поля	Значення в прикладі	Опис та технічна інтерпретація поля
0	\$GPRMC	Ідентифікатор речення (Рекомендований мінімальний набір GNSS даних)
1	123519.00	Поточний час у форматі UTC (12 годин, 35 хвилин, 19 секунд, 00 сотих секунди)

2	A	Статус валідності даних: A (Data Valid - дані достовірні), v (Navigation Receiver Warning - дані недостовірні, триває пошук супутників)
3	4827.81023	Географічна широта об'єкта у форматі DDMM.MMMMM (48 градусів, 27.81023 мінут)
4	N	Напрямок широти: n (North - північна), s (South - південна)
5	03019.24518	Географічна довгота об'єкта у форматі DDDMM.MMMMM (030 градусів, 19.24518 мінут)
6	E	Напрямок довготи: e (East - східна), w (West - західна)
7	0.022	Швидкість руху об'єкта над поверхнею в вузлах (knots)
8	-	Поточний курс (істинний кут напрямку руху) у градусах (порожнє за відсутності руху)
9	230526	Поточна дата за календарем UTC у форматі DDMMYY (23 травня 2026 року)
10	-	Магнітне схилення у градусах
11	-	Напрямок магнітного схилення (E/W)

12	A	Індикатор режиму роботи позиціонування (Autonomous)
13	75	Шістнадцяткова контрольна сума речення для перевірки цілісності даних при передачі

Процес програмної обробки даних у мікроконтролері зводиться до накопичення вхідних символів з UART-інтерфейсу в буферному масиві за допомогою переривань. Після виявлення символів завершення рядка (`\r\n`) алгоритм перевіряє контрольну суму. Якщо вона збігається з обчисленою, запускається функція розбиття рядка на підрядки за роздільником-комою (токенізація). Далі з відповідних полів вилучаються байти часу, дати та символу валідності (A/V). Наявність символу A сигналізує мікроконтролеру, що отриманий час є абсолютно точним, і його можна використовувати для коригування локальних лічильників системи.

Окрім базового речення \$GPRMC, для глибокого аналізу якості зв'язку, отримання інформації про просторове розташування та оцінки рівня сигналу, мікроконтролер може аналізувати інші типи стандартизованих повідомлень. Серед них найбільш важливим для оцінки достовірності розрахованого часу є речення \$GPGGA (Global Positioning System Fix Data).

Це повідомлення містить розширені дані про тривимірну фіксацію об'єкта, кількість супутників, що беруть участь у розв'язанні навігаційної задачі, та фактор погіршення точності. Типовий вигляд рядка \$GPGGA:

```
$GPGGA,123519.00,4827.81023,N,03019.24518,E,1,08,0.9,137.5,M,22.5,M,,*47
```

Детальний покомпонентний аналіз структури цього повідомлення наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Декодування полів NMEA речення \$GPGGA

Номер поля	Значення в прикладі	Опис та технічна інтерпретація поля
0	\$GPGGA	Ідентифікатор речення (Дані про фіксацію місцеположення GPS)
1	123519.00	Поточний час у форматі UTC
2 – 5	-	Широта та довгота з індикаторами півкуль (аналогічно до \$GPRMC)
6	1	Індикатор якості фіксації (0 - немає фіксації, 1 - стандартна GPS фіксація (SPS), 2 - диференційна DGPS фіксація)
7	8	Кількість супутників, які використовуються для обчислень (від 00 до 12)
8	0.9	Горизонтальний фактор зниження точності (HDOP). Значення ближче до 1.0 свідчать про ідеальну геометрію супутників.
9 – 10	137.5, М	Висота антени над середнім рівнем моря (Mean Sea Level) у метрах (М - метри)
11 – 12	22.5, М	Геоїдальне перевищення (різниця між еліпсоїдом WGS-84 та рівнем моря) у метрах
13	-	Вік диференційних поправок DGPS (в секундах, зазвичай порожнє для автономного режиму)
14	-	Ідентифікатор базової станції DGPS
15	47	Шістнадцяткова контрольна сума речення

Аналіз поля 7 (кількість супутників) та поля 8 (HDOP) речення \$GPGGA має вагоме значення для систем точного часу. Якщо кількість супутників падає нижче чотирьох, мікроконтролер може програмно відхилити отриману часову мітку як потенційно неточну, оскільки математична система рівнянь псевдовідстаней стає недовизначеною.

Для оцінки фізичної якості радіоканалу та діагностики роботи антени використовується повідомлення \$GPGSV (GNSS Satellites in View). Особливістю цього речення є те, що через обмеження максимальної довжини NMEA-рядка (82 символи), інформація про всі видимі супутники не може вміститися в одному повідомленні. Тому приймач генерує блок із кількох послідовних речень \$GPGSV (від 1 до 4), в кожному з яких міститься інформація про 4 супутники.

Типовий вигляд одного з рядків блоку \$GPGSV:

\$GPGSV,3,1,11,03,03,111,00,04,15,270,00,06,01,010,00,13,06,292,00*74

Структура цього речення наведена у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Декодування полів NMEA речення \$GPGSV

Номер поля	Значення	Опис та технічна інтерпретація поля
0	\$GPGSV	Ідентифікатор речення (Супутники в зоні видимості)
1	3	Загальна кількість речень \$GPGSV у поточному блоці
2	1	Номер цього речення у блоці
3	11	Загальна кількість видимих супутників над горизонтом
4	3	PRN-номер (ідентифікатор) першого супутника у цьому списку
5	3	Кут підвищення (елевація) першого супутника над горизонтом у градусах (00-90)

6	111	Азимут першого супутника відносно істинного півночі у градусах (000-359)
7	0	Відношення сигнал/шум ($SNR / C/N_0$) першого супутника у дБ-Гц. Значення 00 означає, що сигнал не захоплено.
8 – 19	-	Аналогічні блоки даних (PRN, Елевація, Азимут, SNR) для 2-го, 3-го та 4-го супутників відповідно
20	74	Контрольна сума

Параметр відношення сигнал/шум (SNR), який передається у реченні \$GPGSV, є основним індикатором стабільності зв'язку. Для надійного та швидкого отримання ефемерид рівень SNR повинен перевищувати 30 дБ-Гц. Якщо пристрій експлуатується в умовах щільної міської забудови (Urban Canyon), рівень сигналу знижується до 15–20 дБ-Гц, що призводить до суттєвого збільшення часу "холодного старту" (TTFF). Саме для компенсації цих затримок у програмному забезпеченні розробленого годинника встановлено збільшене вікно очікування синхронізації, що становить 2 хвилини.

Ще одним вузькоспеціалізованим повідомленням протоколу NMEA, яке стосується виключно хронометрії, є речення \$GPZDA (Time & Date). Воно було введено у стандарт для зручного розділення компонентів дати (дня, місяця та року), а також для передачі локального зсуву часу (якщо приймач налаштований на його обчислення).

Типовий вигляд рядка \$GPZDA:

\$GPZDA,123519.00,23,05,2026,00,00*60

Таблиця 1.5 - Декодування полів NMEA речення \$GPZDA

Номер поля	Значення	Опис та технічна інтерпретація поля
0	\$GPZDA	Ідентифікатор речення (Час та дата)
1	123519.00	Поточний час у форматі UTC
2	23	Поточний день місяця (01–31)
3	5	Поточний місяць (01–12)
4	2026	Поточний рік (повний, 4 цифри)
5	0	Зміщення локальної часової зони у годинах (від -13 до +13)
6	0	Зміщення локальної часової зони у хвилинах
7	60	Контрольна сума

Головною перевагою \$GPZDA є передача повного 4-значного року (на відміну від \$GPRMC, де передаються лише дві останні цифри, що вимагає програмного додавання "2000" у коді мікроконтролера). Проте речення \$GPZDA має один суттєвий недолік: воно не містить індикатора валідності даних (Status A або V). Модуль може видавати це повідомлення на основі внутрішнього вбудованого годинника ще до того, як успішно захопить сигнали супутників.

Враховуючи вищенаведені особливості кожного типу повідомлень, у межах даної дипломної роботи для реалізації алгоритму парсингу було обрано комбінований підхід з використанням бібліотеки TinyGPS++, яка надає пріоритет даним з речень \$GPRMC та \$GPGGA, гарантуючи, що локальний годинник

мікроконтролера буде оновлено лише після отримання стовідсотково валідної еталонної мітки часу.

1.4. Особливості проєктування автономних електронних пристроїв та методи зниження їх енергоспоживання

При розробці портативних мікроелектронних пристроїв з акумуляторним живленням критерій енергоефективності є таким самим пріоритетним, як і точність функціонування. Автономний годинник розрахований на безперервну тривалу роботу від одного заряду літій-іонного акумулятора (наприклад, типорозміру 18650), тому мінімізація середнього струму споживання системи є ключовим інженерним завданням дипломної роботи.

Загальний струм споживання пристрою I_{total} складається зі споживання всіх його функціональних вузлів:

$$I_{total} = I_{mcu} + I_{gps} + I_{lcd} + I_{power} \quad (1.5)$$

де I_{mcu} - струм мікроконтролера, I_{gps} - струм супутникового модуля, I_{lcd} - струм рідкокристалічного дисплея з підсвіткою, I_{power} - власний струм втрат у перетворювачах напруги та колах захисту.

Проведемо аналіз енергетичного балансу системи. Сучасні 8-бітні мікроконтролери архітектури AVR (зокрема ATmega168P), що працюють на тактовій частоті 16 МГц при напрузі живлення 5 В, в активному режимі споживають близько 10–12 мА. Струм споживання LCD-дисплея 1602 без підсвітки становить лише 1,5–2 мА, проте увімкнення світлодіодної підсвітки екрана миттєво додає до бюджету живлення від 15 до 30 мА (залежно від обмежувального резистора).

Найбільш критичним споживачем у системі є GPS-модуль NEO-6M. У режимі «холодного старту» (коли модуль увімкнувся вперше, його внутрішня

пам'ять порожня, і він здійснює паралельний пошук та захоплення сигналів усіх доступних супутників на декількох каналах частот) струм споживання мікросхеми радіочастотного тракту та базового процесора обробки досягає 45–60 мА. Процес пошуку супутників та завантаження актуальних ефемерид може тривати від 27 секунд до кількох хвилин (залежно від умов прийому та наявності перешкод). Після переходу в режим стеження (Tracking mode) споживання знижується до 35–40 мА, що все одно залишається занадто високим показником для пристрою, який повинен працювати автономно тижнями чи місяцями.

Для кардинального зниження енергоспоживання в роботі впроваджено два основні методи: алгоритмічний та схемотехнічний.

Алгоритмічний метод базується на використанні вбудованих режимів енергозбереження мікроконтролера. Обчислювальне ядро ATmega168P підтримує декілька режимів сну (Sleep Modes), що активуються програмно за допомогою регістра SMCR:

- Idle mode: зупиняється лише тактування процесора, але таймери, UART та система переривань залишаються активними. Споживання знижується до ~3 мА.
- Power-down mode: найбільш глибокий режим сну. Зупиняється зовнішній кварцовий генератор, повністю вимикається цифрове тактування внутрішніх модулів. Активними залишаються лише модуль сторожового таймера (WDT) та переривання від зовнішніх ліній INT0/INT1.

Споживання МК у цьому режимі падає до рекордних 0,1–1 мкА.

Оскільки годинник потребує безперервного відліку часу, а система тактується від єдиного зовнішнього кварцового резонатора на 16 МГц, використання глибоких режимів сну (таких як Power-save або Power-down) є архітектурно неможливим. Перехід у ці режими призупиняє роботу головного тактового генератора, що неминуче призведе до зупинки системного таймера та втрати відліку локального часу. З огляду на це, мікроконтролер функціонує в активному режимі (або переводиться у режим базового очікування Idle, за якого

тактування таймерів не припиняється). За таких умов струм споживання обчислювального ядра становить близько 12 мА, а головним методом забезпечення автономності пристрою виступає не програмний сон процесора, а апаратне знеструмлення найбільш енергоємних зовнішніх вузлів системи.

Схемотехнічний метод вирішує проблему високого споживання GPS-модуля. Оскільки абсолютний час не змінюється хаотично, немає жодної технічної потреби тримати супутниковий приймач увімкненим безперервно. Достатньо вмикати його періодично - наприклад, один раз на добу або один раз на кілька годин для компенсації накопиченого локального дрейфу кварцу мікроконтролера.

Для реалізації цієї логіки у схему пристрою впроваджено електронний силовий ключ на базі транзистора, керований безпосередньо з цифрового виводу (GPIO) мікроконтролера. Спрощена структура транзисторного керування живленням периферійного модуля показана на рисунку 1.3.

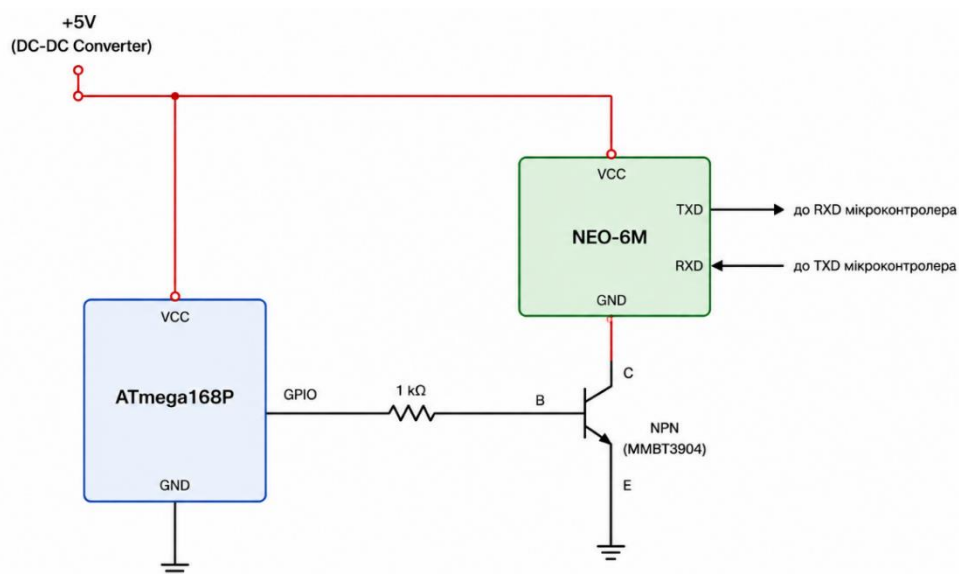


Рисунок 1.3. Структурна схема транзисторного керування живленням GPS-модуля

При виборі конфігурації транзисторного ключа розглядалися два варіанти:

1. Ключ у колі живлення (High-Side Switch): реалізується на Р-канальному польовому транзисторі (або PNP біполярному), увімкненому між виходом

5 В підвищуючого DC-DC перетворювача та виводом VCC GPS-модуля. Перевагою є повне знеструмлення модуля без зсуву потенціалу «землі». Проте Р-канальні транзистори зазвичай мають більший опір відкритого каналу ($R_{DS(on)}$) у порівнянні з N-канальними аналогами і часто потребують додаткових драйверних каскадів для надійного закриття.

2. Ключ у колі заземлення (Low-Side Switch): реалізується на N-канальному польовому (MOSFET) або NPN біполярному транзисторі, увімкненому між виводом GND GPS-модуля та загальною шиною заземлення схеми.

Перевагою є максимальна простота керування прямою логікою від мікроконтролера (логічна "1" відкриває транзистор) та мінімальний опір відкритого каналу, що запобігає падінню напруги живлення на ключі. Відомий недолік цієї топології - можливість виникнення зворотних паразитних витоків струму через захисні діоди ліній зв'язку UART (RX/TX) при розриві кола заземлення - ефективно усувається програмним шляхом. Перед вимкненням транзистора мікроконтролер конфігурує відповідні цифрові виводи порту на вхід без підтягуючих резисторів (стан високого імпедансу, Hi-Z), що повністю ізолює знеструмлений модуль від мікроконтролера.

З огляду на апаратну простоту та надійність, у проєкті обрано архітектуру Low-Side Switch.

Алгоритм функціонування підсистеми енергозбереження набуває такого вигляду: більшість часу транзистор закритий, лінії UART програмно ізольовані, а GPS-модуль повністю знеструмлений ($I_{gps} = 0$). Пристрій працює в режимі низького споживання, здійснюючи локальний відлік часу. При настанні часу синхронізації мікроконтролер переводить піни UART у робочий стан і подає сигнал на відкриття транзисторного ключа (замикаючи коло заземлення). На GPS-модуль подається повноцінне живлення, він прокидається, шукає супутники та надсилає точну часову мітку. Після успішної корекції часу мікроконтролер знову

переводить комунікаційні лінії у стан Hi-Z та негайно закриває транзистор, повертаючи систему в ультраенергоефективний стан.

Додатковим елементом розширення функціональності, інтегрованим у систему, є спеціалізований комунікаційний конектор. Через цей роз'єм сторонні пристрої (наприклад, персональний комп'ютер через USB-UART перетворювач або центральний контролер системи автоматизації) можуть надсилати текстові або бінарні запити за стандартним інтерфейсом UART. Програмне забезпечення мікроконтролера обробляє ці запити у фоновому режимі (за перериваннями прийому USART) і у відповідь передає пакет повної телеметрії пристрою. У пакет телеметрії включено такі критичні змінні:

- Поточний скоригований астрономічний час (години, хвилини, секунди).
- Поточний зміщений часовий пояс (таймзона, що налаштовується користувачем).
- Поточна календарна дата (день, місяць, рік).
- Поточний рівень заряду літій-іонного акумулятора 18650, вимірний за допомогою вбудованого в мікроконтролер аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Наявність такого інтерфейсу моніторингу дозволяє використовувати автономний годинник не лише як ізольований пристрій індикації, а й як першокласний високонадійний сервер точного часу для локальних промислових та дослідницьких мікропроцесорних мереж.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз теоретичних засад, архітектурних принципів та технічних обмежень, що супроводжують процес проєктування автономних годинникових систем із супутниковою синхронізацією.

1. На основі аналізу існуючих методів хронометрії доведено, що використання глобальної системи позиціонування GPS забезпечує еталонну точність часових міток без накопичення похибок, що є

недосяжним для автономних кварцових RTC-систем, і водночас не потребує розгортання енергоємних наземних мережевих інтерфейсів типу Wi-Fi або GSM.

2. Розглянуто фізико-математичну модель функціонування GPS, що базується на розв'язанні навігаційної задачі трилатерації псевдовідстаней. Обґрунтовано вимогу щодо необхідності одночасного прийому сигналів щонайменше від чотирьох супутників для успішного знаходження часового зсуву локального генератора відносно шкали UTC.
3. Проведено детальний синтаксичний та структурний аналіз міжнародного протоколу NMEA 0183. Виділено специфікацію речення \$GPRMC як найбільш оптимального джерела навігаційно-часових рядків, що містить повний валідний набір байтів часу та дати, необхідних для парсингу мікроконтролером.
4. Досліджено енергетичний баланс портативного пристрою. Визначено, що безперервна робота радіочастотного тракту GPS-модуля (споживання близько 55 мА) є критичною для акумулятора. Для вирішення цієї проблеми запропоновано та теоретично обґрунтовано схемотехнічне рішення Low-Side силового ключа на базі N-канального польового транзистора для повного програмного знеструмлення супутникового модуля в періодах між синхронізаціями шляхом розриву кола заземлення. Також розроблено концепцію діагностичного UART-інтерфейсу для видачі телеметрії.

Таким чином, сформований теоретичний апарат та запропоновані технічні рішення дозволяють перейти до наступного етапу - практичного розрахунку, вибору елементної бази та схемотехнічного проєктування пристрою у середовищі САПР.

РОЗДІЛ 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЮ

2.1. Структурна схема автономного годинника з GPS

Розробка апаратної частини пристрою починається з побудови структурної схеми, яка визначає основні функціональні вузли та інформаційні і енергетичні зв'язки між ними. Враховуючи вимоги до автономності та можливості зовнішнього моніторингу, архітектура пристрою побудована за модульним принципом навколо центрального обчислювального ядра.

Структурна схема розробленого пристрою наведена на рисунку 2.1.

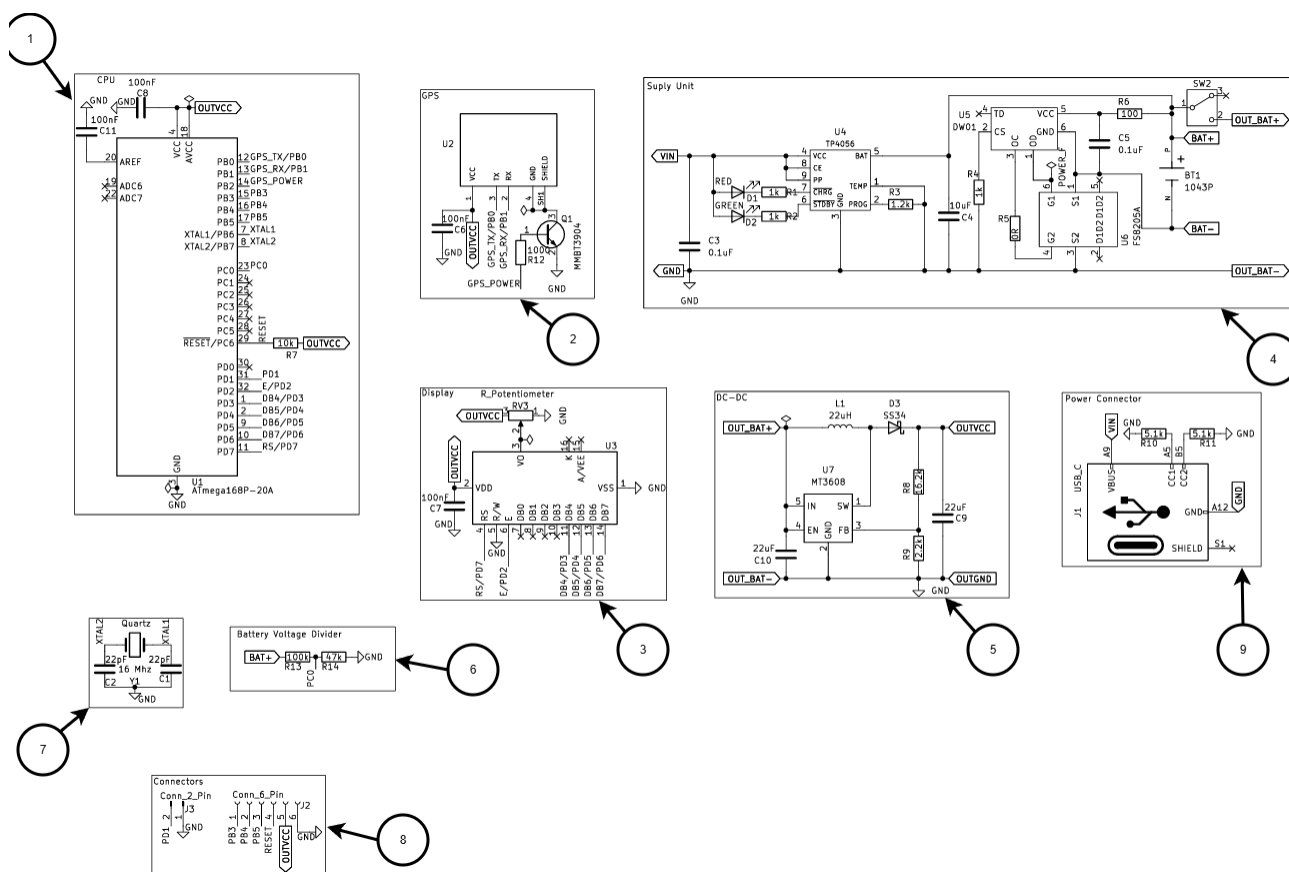


Рисунок 2.1 – Структурна схема автономного годинника із супутниковою синхронізацією

1. Мікроконтролер керування (ATmega168P) - основний керуючий вузол системи.
2. GPS-модуль (NEO-6M) - прийом координат і точного часу з транзисторним комутатором (Low-Side Switch) - керування живленням GPS-модуля.

3. LCD-дисплей 1602A - відображення часу та службової інформації.
4. Контролер заряду TP4056 - заряд і захист Li-Ion акумулятора.
5. DC-DC перетворювач MT3608 - формування стабільної напруги 5 В.
6. Подільник напруги АЦП - вимірювання напруги акумулятора.
7. Кварцовий резонатор 16 МГц - тактування мікроконтролера.
8. Роз'єми та інтерфейси - програмування та підключення периферії.
9. Роз'єм живлення USB Type-C - підключення зовнішнього живлення та заряджання акумулятора.

Центральним елементом системи (позиція 1) є 8-бітний мікроконтролер, який отримує тактові імпульси від зовнішнього кварцового резонатора частотою 16 МГц. Використання зовнішнього тактування є критично важливим для забезпечення стабільної роботи апаратного модуля USART, через який здійснюється зв'язок із супутниковим приймачем (позиція 2) та зовнішнім комунікаційним інтерфейсом (позиція 8).

Живлення системи забезпечується літій-іонним акумулятором типорозміру 18650, заряд якого контролюється модулем на базі TP4056 (позиція 5). Оскільки для коректної роботи мікроконтролера та дисплея (позиція 3) потрібна стабільна напруга 5 В, а напруга на акумуляторі змінюється в межах 3,2...4,2 В, у схему інтегровано підвищуючий імпульсний перетворювач (позиція 6). Для реалізації енергозберігаючого алгоритму живлення GPS-модуля заведено через електронний ключ (позиція 4), який фізично розриває коло заземлення модуля за командою від мікроконтролера.

2.2. Схемотехнічна реалізація підсистеми керування та індикації

В якості обчислювального ядра (U1 згідно з принциповою електричною схемою) обрано мікроконтролер ATmega168P у корпусі TQFP-32. Вибір даного мікроконтролера обґрунтований наявністю достатнього обсягу флеш-пам'яті (16 КБ) для розміщення алгоритмів парсингу NMEA-повідомлень, а також наявністю апаратного UART та багатоканального АЦП.

Схема тактування реалізована за допомогою зовнішнього кварцового резонатора Y1 на 16 МГц, який підключено до виводів XTAL1 (PB6) та XTAL2 (PB7) мікроконтролера. Для забезпечення стійкої генерації та запобігання збудженню на вищих гармоніках, паралельно резонатору встановлено два навантажувальні керамічні конденсатори ємністю по 22 пФ, які з'єднані з шиною загального проводу (GND).

Для забезпечення надійного запуску мікроконтролера при подачі живлення, на вивід скидання RESET (PC6) встановлено підтягуючий резистор номіналом 10 кОм до шини +5 В.

Виведення візуальної інформації (поточного часу, дати та статусу синхронізації) здійснюється на символьний рідкокристалічний дисплей LCD 1602A (на схемі позначений як U3). Для економії кількості використовуваних портів вводу-виводу мікроконтролера, індикатор підключено за 4-бітною схемою. Шина даних (виводи D4-D7 дисплея) та лінії керування (RS, EN) підключені безпосередньо до цифрових виводів мікроконтролера. Контрастність дисплея налаштовується за допомогою підлаштовувального резистора (потенціометра) номіналом 10 кОм, увімкненого між шиною +5 В та загальним проводом, із середньою точкою, виведеною на пін V0 індикатора.

2.3. Проектування підсистеми енергозбереження та моніторингу телеметрії

Найбільш відповідальним вузлом з точки зору енергоефективності є підсистема керування живленням GPS-модуля NEO-6M. Оскільки модуль у режимі пошуку супутників споживає значний струм, реалізовано схемотехнічне рішення керованого вимкнення за допомогою транзисторного ключа нижнього рівня (Low-Side Switch).

Фрагмент принципової електричної схеми керування модулем наведено на рисунку 2.2.

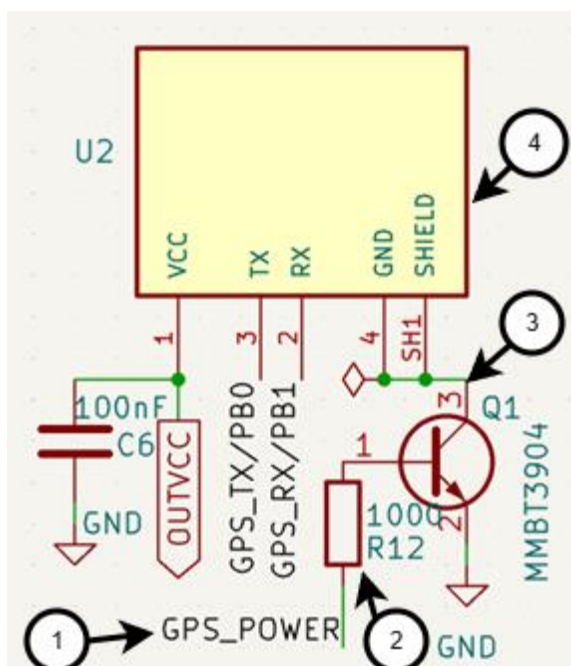


Рисунок 2.2 – Принципова схема транзисторного ключа живлення супутникового приймача

- 1 - вивід керування (GPIO) від мікроконтролера;
- 2 - струмообмежувальний резистор у колі бази;
- 3 - комутуючий транзистор (Low-Side);
- 4 - модуль GPS (NEO-6M).

Принцип дії полягає у розриві загального проводу (GND) GPS-модуля. Керуючий сигнал з порту мікроконтролера через струмообмежувальний резистор надходить на керуючий електрод транзистора (базу або затвор). Коли мікроконтролер видає логічну одиницю (+5 В), транзистор відкривається, його опір падає до мінімуму, і вивід GND модуля надійно з'єднується з фізичною «землею» плати, що ініціює включення та запуск модуля. Перехід лінії у стан логічного нуля повністю знеструмлює модуль.

Додатковою інновацією проєкту є впровадження зовнішнього інтерфейсу моніторингу. На друкованій платі передбачено роз'єм, до якого виведено лінії TX та GND. Це дозволяє зовнішнім пристроям запитувати та отримувати розширену

телеметрію, що включає час, дату, обрану таймзону та поточну напругу акумулятора.

Для вимірювання напруги літій-іонного акумулятора використовується аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера. Оскільки опорна напруга АЦП може бути налаштована на внутрішнє джерело (наприклад, 1,1 В або напругу живлення 5 В), а напруга акумулятора досягає 4,2 В, у схему введено резистивний подільник напруги.

Подільник увімкнений між позитивним полюсом акумулятора (до входу DC-DC перетворювача) та шиною загального проводу. Середня точка подільника підключена безпосередньо до аналогового входу PC0 (канал ADC0) мікроконтролера. Номінали резисторів обрані наступним чином: верхнє плече, підключене до плюса акумулятора, становить 100 кОм, а нижнє плече, підключене до землі, - 47 кОм. Такий вибір забезпечує оптимальний коефіцієнт ділення, при якому максимальна напруга акумулятора (4,2 В) масштабується до безпечного рівня (близько 1,34 В), що гарантовано знаходиться в межах діапазону вимірювання АЦП мікроконтролера (від 0 до 5 В). Це дозволяє програмно контролювати глибину розряду та своєчасно інформувати користувача (шляхом видачі телеметричних даних через інтерфейс UART) про поточний рівень заряду та необхідність заряджання пристрою.

2.4. Схемотехнічна реалізація підсистеми живлення та заряду

Для забезпечення тривалої автономної роботи пристрою в якості основного джерела живлення обрано літій-іонний (Li-ion) акумулятор типорозміру 18650. Робоча напруга такого елемента змінюється в процесі експлуатації від 4,2 В (повний заряд) до 3,0 В (глибокий розряд). Проте для стабільного функціонування мікроконтролера ATmega168P на тактовій частоті 16 МГц, а також для нормальної роботи рідкокристалічного дисплея 1602A та GPS-модуля необхідна стабілізована напруга живлення рівня 5 В.

З огляду на це, підсистема живлення розділена на два функціональні блоки: контролер заряду із захистом акумулятора та підвищуючий імпульсний перетворювач напруги (DC-DC Boost Converter). Принципова схема підсистеми живлення наведена на рисунку 2.3.

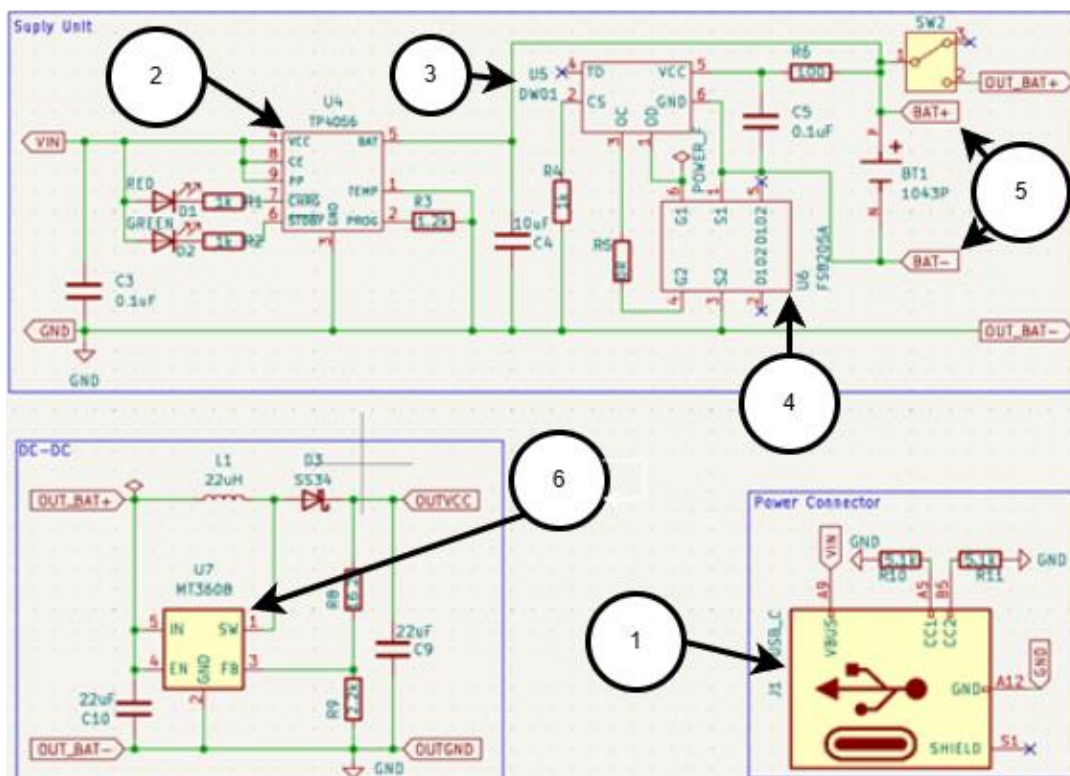


Рисунок 2.3 – Принципова електрична схема підсистеми живлення та заряду

- 1 - вхідний роз'єм (USB) для підключення зовнішнього джерела живлення 5 В;
- 2 - лінійний контролер заряду літій-іонного акумулятора (TP4056);
- 3 - спеціалізована мікросхема захисту акумулятора (DW01);
- 4 - збірка N-канальних MOSFET-транзисторів для комутації навантаження (FS8205A);
- 5 - контакти підключення літій-іонного акумулятора 18650;
- 6 - підвищуючий імпульсний перетворювач напруги (MT3608).

Блок заряду реалізовано на базі інтегральної мікросхеми TP4056 (позиція 2), яка забезпечує заряд акумулятора за алгоритмом CC/CV (Constant Current / Constant Voltage - постійний струм / постійна напруга). Струм заряду

програмується зовнішнім резистором, підключеним до виводу PROG мікросхеми (номінал 1,2 кОм задає струм заряду на рівні 1 А).

Для запобігання виходу акумулятора з ладу через нештатні режими роботи, у схему інтегровано вузол захисту на базі мікросхеми DW01 (позиція 3) та силової транзисторної збірки FS8205A (позиція 4). Цей вузол безперервно моніторить напругу на клеммах акумулятора та розриває коло розряду, якщо напруга падає нижче 2,4 В (захист від перерозряду), або коло заряду, якщо напруга перевищує 4,25 В (захист від перезаряду). Також мікросхема DW01 забезпечує апаратний захист від короткого замикання в навантаженні.

Формування стабільної напруги 5 В покладено на мікросхему MT3608 (позиція 6) - високоефективний підвищуючий перетворювач, що працює на фіксованій частоті перемикання 1,2 МГц. Висока частота дозволяє використовувати малогабаритні SMD-компоненти в обв'язці, зокрема накопичувальний дросель індуктивністю 22 мкГн та керамічні фільтруючі конденсатори. Вихідна напруга перетворювача задається резистивним подільником у колі зворотного зв'язку (Feedback) мікросхеми і налаштована на рівень 5,0 В, що забезпечує номінальний режим роботи всієї цифрової частини годинника.

2.5. Математичний розрахунок параметрів підсистеми живлення та вимірювання

Для забезпечення надійної роботи пристрою та обґрунтування вибору елементної бази необхідно провести математичний розрахунок ключових вузлів: підвищуючого перетворювача напруги, лінійного контролера заряду та вимірювального кола аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

2.5.1. Розрахунок параметрів підвищуючого перетворювача напруги MT3608

Мікросхема MT3608 є імпульсним DC-DC перетворювачем топології Boost, що працює на частоті $f_{sw} = 1.2$ МГц. Головним завданням розрахунку є визначення номіналів резисторів зворотного зв'язку для отримання стабільної напруги $V_{out} = 5.0$ В та перевірка режиму роботи накопичувального дроселя.

Напруга на виході перетворювача задається зовнішнім резистивним ділянником, підключеним до виводу FB (Feedback). Внутрішня опорна напруга мікросхеми становить $V_{ref} = 0.6$ В. Рівняння для вихідної напруги має вигляд:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.1)$$

де R_1 - резистор між виходом перетворювача та виводом FB; R_2 - резистор між виводом FB та загальним проводом GND.

Для досягнення високої точності вихідної напруги на принциповій схемі обрано комбінацію прецизійних постійних резисторів. Опір нижнього плеча становить $R_2 = 2.2$ кОм (стандартний ряд E24). Тоді необхідний опір верхнього плеча $V_{out} \approx 5.0$ для отримання $V_{out} \approx 5.0$ В розраховується як:

$$R_1 = R_2 \cdot \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1\right) = 2.2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{5.0}{0.6} - 1\right) = 16.13 \text{ кОм}$$

Оскільки резистора рівно 16.13 кОм не існує, у схемі застосовано найближчий прецизійний номінал з ряду E96 із допуском 1% - $R_1 = 16.2$ кОм.

Перевіримо реальну напругу на виході перетворювача з цими номіналами:

$$V_{out,real} = 0.6 \cdot \left(1 + \frac{16.2}{2.2}\right) = 0.6 \cdot (1 + 7.3636) \approx 5.018 \text{ В}$$

Отримане значення (5.018 В) є ідеальним для живлення 5-вольтової логіки мікроконтролера та дисплея. Використання прецизійних постійних резисторів дозволило відмовитися від застосування підлаштовувальних потенціометрів, що суттєво підвищує загальну вібростійкість та експлуатаційну надійність пристрою.

Далі розрахуємо пульсації струму в накопичувальному дроселі (ΔI_L). Це важливо для вибору індуктивності, яка не повинна входити в режим насичення. Формула для розрахунку пульсацій струму у неперервному режимі (CCM):

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot (V_{out} - V_{in})}{V_{out} \cdot L \cdot f_{sw}} \quad (2.2)$$

Для найгіршого випадку приймаємо напругу розрядженого акумулятора $V_{in} = 3.2$ В. Застосований на схемі дросель має індуктивність $L = 22$ мкГн ($22 \cdot 10^{-6}$ Гн). Частота перемикання $f_{sw} = 1.2 \cdot 10^6$ Гц.

$$\Delta I_L = \frac{3.2 \cdot (5.018 - 3.2)}{5.018 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 1.2 \cdot 10^6} = \frac{3.2 \cdot 1.818}{5.018 \cdot 26.4} = \frac{5.817}{132.47} \approx 43 \text{ мА}$$

Максимальний струм, що протікатиме через дросель (I_{L_peak}), дорівнює сумі середнього вхідного струму та половини розмаху пульсацій. Оскільки максимальне споживання системи в режимі синхронізації не перевищує 110 мА, дросель на 22 мкГн з номінальним струмом насичення від 1 А гарантує стабільну роботу перетворювача без перегріву та падіння індуктивності.

2.5.2. Розрахунок режиму заряду та теплового балансу контролера TP4056

Мікросхема TP4056 є лінійним контролером заряду. Струм заряду акумулятора (I_{CHG}) програмується за допомогою єдиного зовнішнього резистора

R_{PROG} , підключеного між виводом PROG та GND. Згідно з технічною документацією, залежність має вигляд:

$$I_{CHG} = \frac{1200}{R_{PROG}} \quad (2.3)$$

Для забезпечення оптимального часу зарядки акумулятора 18650 ємністю 2500 мА·год, цільовий струм заряду обрано на рівні 1000 мА (1 А), що відповідає режиму заряду 0.4С. Обчислимо необхідний номінал резистора:

$$R_{PROG} = \frac{1200}{I_{CHG}} = \frac{1200}{1} = 1.2 \text{ кОм}$$

Найважливішим аспектом використання лінійного стабілізатора є його тепловий режим роботи. Вся різниця між вхідною напругою (від USB, $V_{USB} = 5.0$ В) та поточною напругою на акумуляторі (V_{BAT}) розсіюється мікросхемою у вигляді тепла. Максимальна потужність розсіювання (P_D) спостерігається на початку циклу заряду (фаза CC - Constant Current), коли акумулятор сильно розряджений (наприклад, $V_{BAT} = 3.0$ В):

$$P_D = (V_{USB} - V_{BAT}) \cdot I_{CHG} = (5.0 - 3.0) \cdot 1.0 = 2.0 \text{ Вт}$$

Оскільки лінійний контролер заряду розсіює надлишок напруги у вигляді тепла, для забезпечення стабільного струму в 1 А та запобігання перегріву мікросхеми застосовано стандартне правило проєктування: при трасуванні друкованої плати під корпусом TP4056 передбачено тепловідвідний мідний полігон (Thermal Pad) із перехідними отворами (Vias) для ефективного розсіювання тепла на нижній шар плати. Це гарантує стабільну роботу контролера без активації вбудованого термозахисту.

2.5.3. Розрахунок вимірювального кола (дільника напруги) для АЦП

Для передачі телеметричних даних про стан акумулятора мікроконтролер використовує вбудований 10-бітний аналого-цифровий перетворювач. Напруга живлення АЦП та його джерело опорної напруги (AREF) дорівнюють напрузі живлення цифрової шини ($V_{ref_adc} = 5.0 \text{ В}$).

Оскільки максимальна напруга повністю зарядженого літій-іонного акумулятора становить $V_{bat_max} = 4.2 \text{ В}$, теоретично цю напругу можна було б подати безпосередньо на вхід АЦП (вона не перевищує 5.0 В). Проте, з метою захисту порту мікроконтролера від можливих імпульсних перенапруг або випадкових замикань, а також для зниження споживаного струму, застосовано резистивний дільник напруги.

У схемі встановлено резистори: верхнє плече $R_3 = 100 \text{ кОм}$, нижнє плече $R_4 = 47 \text{ кОм}$.

Визначимо максимальну напругу, яка надійде на вхід АЦП (V_{adc_max}) при повному заряді батареї (4.2 В):

$$V_{adc_max} = V_{bat_max} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 4.2 \cdot \frac{47}{100 + 47} \approx 1.34 \text{ В}$$

Отримана напруга (1.34 В) гарантовано лежить у безпечному діапазоні для мікроконтролера (від 0 до 5 В).

Оскільки АЦП має роздільну здатність 10 біт (1024 градації), крок квантування (q) становить:

$$q = \frac{V_{ref_adc}}{1024} = \frac{5.0}{1024} \approx 0.00488 \text{ В/біт}$$

У програмному коді мікроконтролера відновлення реального значення напруги на акумуляторі реалізується через зворотну математичну пропорцію:

$$V_{bat} = ADC_Value \cdot \frac{5.0}{1023} \cdot \frac{100 + 47}{47}$$

Даний розрахунок підтверджує правильність вибору номіналів дільника, який забезпечує достатню точність вимірювання (близько 15 мВ на крок АЦП) та споживає мізерний струм $I = 4.2/147000 = 28$ мкА, що жодним чином не впливає на автономність пристрою.

2.6. Розробка загальної принципової електричної схеми

На основі спроектованих функціональних вузлів було створено загальну принципову електричну схему пристрою у середовищі автоматизованого проектування електронних пристроїв KiCad (EDA). Повна принципова електрична схема автономного годинника наведена у Додатку А.

Під час об'єднання вузлів в єдину схему було дотримано правил електромагнітної сумісності (EMC). Зокрема, паралельно виводам живлення мікроконтролера (VCC - GND, AVCC - GND) та мікросхеми GPS-приймача встановлено керамічні блокувальні конденсатори ємністю 0,1 мкФ. Їх функція полягає у придушенні високочастотних пульсацій струму та завад, що генеруються під час перемикання логічних вентилів усередині мікросхем, а також пульсацій, що надходять від імпульсного перетворювача MT3608.

Лінії зв'язку UART (RX, TX), що йдуть від GPS-модуля до мікроконтролера, а також до зовнішнього комунікаційного роз'єму, розведено мінімально можливою довжиною для запобігання спотворенню цифрових сигналів.

2.7. Проєктування друкованої плати та топологія трасування

Завершальним етапом апаратної розробки автономного годинника стало проєктування друкованої плати. Топологію плати розроблено у середовищі автоматизованого проєктування з урахуванням сучасних вимог до цілісності сигналів, електромагнітної сумісності та теплового балансу.

Плата має двошарову структуру, що дозволило оптимально розділити сигнальні лінії та полігони живлення. Компонування елементів (Placement) виконано за модульним принципом, де компоненти згруповано відповідно до їхнього функціонального призначення.

Топологія верхнього (Top Layer) та нижнього (Bottom Layer) шарів розробленої друкованої плати наведена на рисунках 2.4 та 2.5 відповідно.

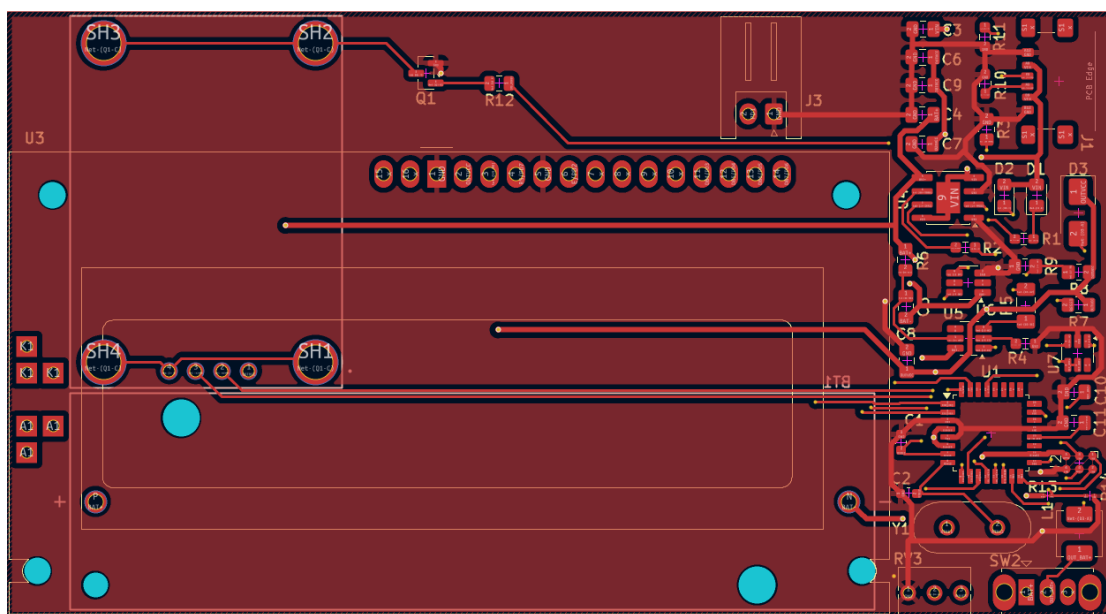


Рисунок 2.4 - Топологія верхнього шару (Top Layer) друкованої плати

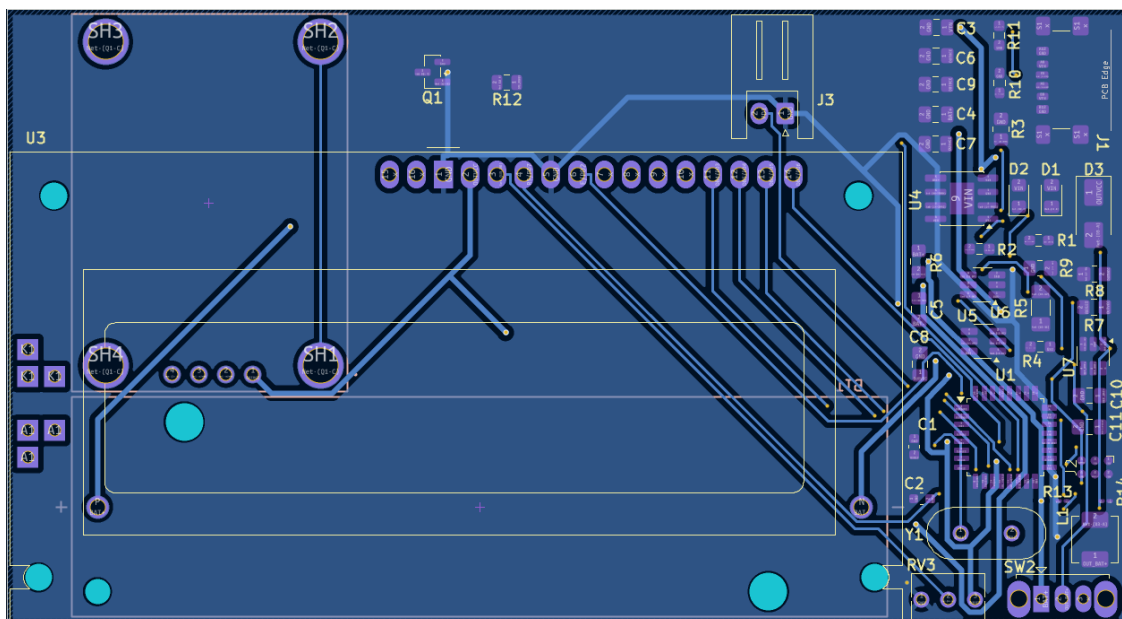


Рисунок 2.5 - Топологія нижнього шару (Bottom Layer) друкованої плати

1. Розміщення та індикація: Більшу частину площі верхнього шару займає рідкокристалічний дисплей формату 1602. У нижній частині плати розташовано підлаштовувальний резистор (потенціометр), який використовується виключно для апаратного налаштування контрастності LCD-матриці (вивід V0). Керуючий повзунковий перемикач живлення винесено на край плати для зручності доступу користувача.

2. Підсистема живлення та заряду: У верхньому правому куті реалізовано вузол заряджання. В якості вхідного інтерфейсу застосовано сучасний та надійний роз'єм USB Type-C. Трасування мікросхеми лінійного контролера заряду TP4056 виконано з дотриманням жорстких теплових норм: під її корпусом сформовано мідний полігон, з'єднаний масивом перехідних отворів із суцільним земляним полігоном (GND) на нижньому шарі для ефективного розсіювання теплової потужності. Імпульсний підвищуючий перетворювач MT3608 та його накопичувальний дросель розміщено максимально компактно. Довжина провідників у вузлі перемикання (між виводом SW мікросхеми, дроселем та діодом Шотткі) зведена до мінімуму. Це дозволило різко зменшити площу

контур протікання імпульсних струмів, що є головним джерелом електромагнітних завад (ЕМІ) у пристрої.

3. Цифрове обчислювальне ядро: Мікроконтролер ATmega168P у корпусі TQFP-32 розміщено у правій частині плати, неподалік від інтерфейсних виводів дисплея, що дозволило прокласти шину даних паралельними провідниками однакової довжини. Особливу увагу приділено трасуванню зовнішнього тактового генератора: кварцовий резонатор (16 МГц) та його навантажувальні конденсатори розташовані впритул до виводів XTAL1 та XTAL2 мікроконтролера. Під кварцовим резонатором розведено суцільний земляний екран без перетину з іншими сигнальними лініями, що захищає високочастотний тактовий сигнал від наведень і гарантує стабільну роботу інтерфейсу UART.

4. Керування зовнішньою периферією: У лівій верхній частині плати інтегровано вузол енергозбереження - польовий транзистор Q1 у корпусі SOT-23, який виконує роль Low-Side ключа для розриву кола заземлення зовнішнього GPS-модуля. Його розташування поруч із контактними майданчиками для підключення супутникового приймача мінімізує падіння напруги на силових доріжках під час пікового споживання (у режимі "гарячого" старту GPS).

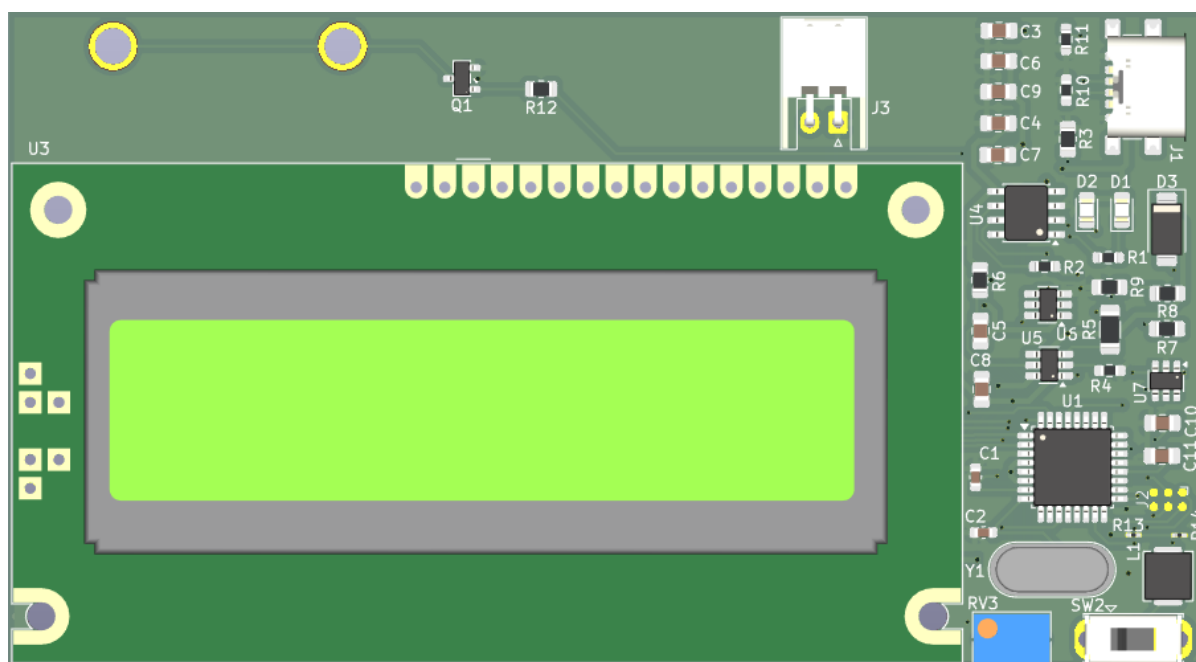


Рисунок 2.6 – Тривимірна модель розробленої друкованої плати

Вільний простір на обох шарах плати заповнено суцільними земляними полігонами (Copper Pours), які з'єднані між собою сіткою перехідних отворів. Це формує низькоімпедансний зворотний шлях для всіх струмів та слугує додатковим екраном від зовнішніх радіочастотних завад.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі проведено комплексне проектування апаратної частини автономного годинника з GPS-синхронізацією:

1. Розроблено модульну структурну схему пристрою, яка визначила взаємодію ключових компонентів: обчислювального ядра, підсистеми індикації, супутникового модуля та блоку живлення.
2. В якості керуючого пристрою обрано мікроконтролер ATmega168P, який для забезпечення максимальної стабільності роботи апаратних інтерфейсів тактується від зовнішнього кварцового генератора на 16 МГц. Індикацію реалізовано на енергоефективному дисплеї LCD 1602A з 4-бітним інтерфейсом керування.
3. Розраховано та імплементовано схемотехнічне рішення керування живленням GPS-модуля NEO-6M за допомогою транзисторного ключа нижнього рівня (Low-Side Switch). Це рішення дозволяє повністю відключати супутниковий приймач від шини заземлення, зводячи його струм споживання в режимі очікування до нуля.
4. Впроваджено діагностичний інтерфейс UART, що виведено на зовнішній конектор, для передачі телеметричних даних. Вимірювання напруги акумулятора для потреб телеметрії реалізовано через аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера з використанням резистивного подільника напруги.
5. Спроектовано високонадійну підсистему живлення, що поєднує модуль лінійного заряду акумулятора 18650 (TP4056), комплексну схему захисту

елемента живлення (DW01 + FS8205A) та високоефективний підвищуючий перетворювач (MT3608) для формування стабільної шини 5 В.

6. Усі розроблені вузли інтегровано в єдину принципову електричну схему в середовищі KiCad з дотриманням вимог щодо фільтрації живлення та електромагнітної сумісності.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ РОБОТИ ПРИБОРУ

3.1. Структура програмного забезпечення та загальний алгоритм роботи

Програмне забезпечення для керуючого мікроконтролера ATmega168P розроблено мовою C++ з використанням екосистеми та бібліотек середовища розробки Arduino IDE. Архітектура програми побудована за принципом суперциклу (main loop) із застосуванням неблокуючих алгоритмів опитування (polling), що дозволяє системі одночасно відліковувати час, опитувати периферію та оновлювати індикацію без використання апаратних переривань від таймерів для основних задач.

Загальний алгоритм роботи пристрою можна розділити на кілька логічних потоків, які виконуються квазіпаралельно у головному циклі програми:

1. Програмний відлік локального часу (Software RTC).
2. Опитування аналого-цифрового перетворювача (АЦП) для визначення рівня заряду акумулятора.
3. Керування автоматом станів синхронізації (увімкнення/вимкнення GPS-модуля та обробка вхідних даних).
4. Оновлення інформації на рідкокристалічному дисплеї.
5. Формування та відправка телеметричних даних через апаратний інтерфейс UART.

Блок-схема узагальненого алгоритму роботи головного циклу наведена на рисунку 3.1.

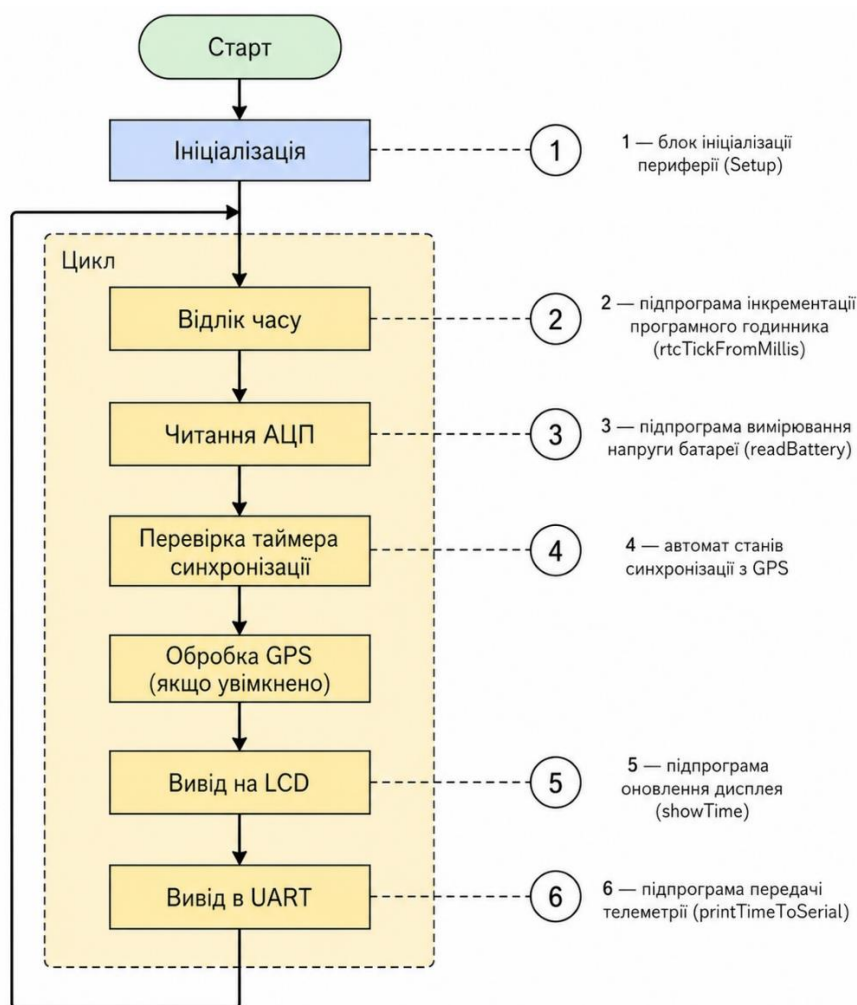


Рисунок 3.1 – Блок-схема головного алгоритму роботи мікроконтролера

Використання системної функції `millis()`, яка повертає кількість мілісекунд з моменту запуску мікроконтролера, дозволяє уникнути блокуючих затримок `delay()`. Усі часові інтервали (період синхронізації, вікно очікування супутників, інтервал видачі телеметрії) обчислюються як різниця між поточним значенням таймера та збереженою часовою міткою останньої події.

3.2. Реалізація внутрішнього годинника (RTC) та керування енергозбереженням

Оскільки у розробленому пристрої відсутня зовнішня апаратна мікросхема годинника реального часу (наприклад, DS3231), функцію відліку часу покладено безпосередньо на обчислювальне ядро мікроконтролера (програмний RTC).

Логіка роботи програмного RTC реалізована у функції `rtcTickFromMillis()`. Ця функція безперервно відстежує зміну системного таймера `millis()`. При накопиченні різниці в 1000 мілісекунд (1 секунда), викликається підпрограма `addOneSecond()`, яка інкрементує лічильник секунд. При переповненні секунд відбувається каскадне збільшення хвилин, годин, днів, місяців та років із обов'язковим урахуванням кількості днів у кожному місяці та високосних років (функція `isLeap()`).

Для мінімізації енергоспоживання системи розроблено автомат станів керування живленням GPS-модуля. Логіка його роботи описується двома константами: `SYNC_PERIOD_MS` (період між синхронізаціями, встановлений на рівні 24 годин) та `SYNC_WINDOW_MS` (максимальний час, відведений на пошук супутників, встановлений на рівні 2 хвилин).

Коли настає час синхронізації, мікроконтролер викликає функцію `gpsPower(true)`, яка встановлює на цифровому виводі D10 високий логічний рівень. Це призводить до відкриття транзисторного ключа (Low-Side Switch) і подачі живлення на модуль NEO-6M. Якщо протягом двох хвилин (вікно синхронізації) модуль успішно знаходить супутники, отримує точний час та координати, система оновлює змінні програмного RTC і миттєво вимикає живлення модуля (`gpsPower(false)`). Якщо через складні погодні умови або відсутність прямої видимості неба модуль не зміг отримати валідні дані за 2 хвилини, мікроконтролер примусово перериває сесію (Timeout), зберігаючи енергію акумулятора до наступної спроби.

3.3. Обробка навігаційних даних та автоматичне обчислення часового поясу

Для комунікації з GPS-модулем реалізовано програмний послідовний порт (Software UART) на виводах D8 (RX) та D9 (TX) на швидкості 9600 бод. Синтаксичний аналіз (парсинг) вхідних NMEA-повідомлень здійснюється за допомогою бібліотеки TinyGPS++. У головному циклі кожен прийнятий байт передається у метод `gps.encode()`, який автоматично розпізнає та структурує речення `$GPRMC` та `$GPGGA`.

Особливістю системного часу GPS є те, що він передається у форматі Всесвітнього координованого часу (UTC), який не збігається з локальним часом у більшості країн світу. Традиційно у подібних пристроях часовий пояс (Time Zone, TZ) жорстко задається у коді програми (Hardcode). Проте у даній роботі реалізовано інноваційний алгоритм автоматичного обчислення часового поясу на основі географічної довготи (Longitude), отриманої від супутників.

Земна куля поділена на 24 базові часові пояси, кожен з яких займає приблизно 15 градусів географічної довготи ($360^\circ/24 = 15^\circ$). У програмному коді обчислення локального зміщення реалізовано наступним математичним виразом:

```
int newTZ = (int)round(gps.location.lng() / 15.0);
```

Після отримання валідних координат мікроконтролер ділить значення довготи на 15 та математично округлює результат. Знайдене зміщення застосовується до поточного часу UTC за допомогою спеціально розробленої функції `shiftRtcHours()`, яка коректно обробляє перехід через нуль годин (зміну доби), віднімаючи або додаючи дні, місяці та роки. Це робить розроблений годинник повністю глобальним пристроєм: він автоматично показуватиме правильний локальний час у будь-якій точці світу після першої ж успішної синхронізації.

3.4. Вимірювання рівня заряду та формування телеметричних даних

Важливим компонентом програмного забезпечення є система моніторингу енергетичного стану акумулятора. Для вимірювання напруги використовується апаратний 10-бітний АЦП мікроконтролера (вхід A0) з опорною напругою живлення (5 В). Оскільки напруга акумулятора (до 4,2 В) подається на АЦП через резистивний подільник, програмний розрахунок реальної напруги V_{bat} у функції readBattery() виконується за формулою:

$$V_{bat} = \frac{ADC \cdot 5.0}{1023} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3.1)$$

де ADC - цифрове значення з перетворювача (0..1023), R_1 - опір верхнього плеча подільника (100 кОм), R_2 - опір нижнього плеча подільника (47 кОм). Залежно від виміряної напруги обчислюється залишковий рівень заряду у відсотках (від 0% при 3,3 В до 100% при 4,2 В).

Для забезпечення можливості зовнішнього контролю, мікроконтролер формує телеметричний пакет даних і кожні 10 секунд відправляє його через апаратний інтерфейс USART (виводи TX/RX) на швидкості 115200 бод. Формат телеметричного рядка має вигляд:

DD.MM.YYYY HH:MM:SS TZ+X BAT Y.YYV ZZ%

Ця інформація дублюється у скороченому вигляді на локальному LCD-дисплеї (формат індикації: дата, відсоток заряду на першому рядку; час та часовий пояс на другому).

3.5. Алгоритмічна реалізація кооперативної багатозадачності та математичної моделі програмного RTC

Однією з головних проблем при розробці програмного забезпечення для вбудованих систем є паралельне виконання завдань. Стандартний підхід із

використанням блокуючих затримок (наприклад, функції `delay()`) є неприпустимим для розробленого автономного годинника, оскільки під час очікування синхронізації з GPS-приймачем (яка може тривати до 120 секунд) мікроконтролер перестав би відліковувати локальний час та оновлювати індикацію.

Для вирішення цієї проблеми програмне забезпечення годинника побудовано на принципах кооперативної багатозадачності з використанням детермінованого скінченного автомата (State Machine). Базовим таймером виступає системна функція `millis()`, яка повертає кількість мілісекунд з моменту старту мікроконтролера.

Кожен логічний вузол програми (відлік часу, опитування датчиків, синхронізація) перевіряє дельту часу Δt між поточним значенням таймера та збереженою міткою останньої дії:

$$\Delta t = \text{millis}() - t_{\text{last_event}} \quad (3.2)$$

Якщо Δt перевищує заданий інтервал, виконується дія, а мітка часу оновлюється. Наприклад, обробка програмного годинника реального часу (RTC) викликається функцією `rtcTickFromMillis()`. Вона перевіряє, чи пройшла 1 секунда (1000 мс), і лише тоді викликає функцію інкрементування `addOneSecond()`. Цикл `while` у цій функції гарантує, що навіть у випадку затримки основного циклу на кілька секунд (через обробку переривань), жодна секунда не буде втрачена, і годинник наздожене реальний час.

3.5.1. Математична модель каскадного інкрементування часу

Оскільки пристрій не має апаратної RTC-мікросхеми, логіка переходу між секундами, хвилинами, годинами, днями, місяцями та роками реалізована

програмно. Головною складністю такого підходу є змінна кількість днів у місяцях та врахування високосних років.

Для вирішення цієї задачі імплементовано функцію `isLeap(int y)`, яка математично визначає високосний рік за Григоріанським календарем за наступним алгоритмом:

1. Якщо рік кратний 400 - він високосний (повертається `true`).
2. Якщо рік кратний 100, але не кратний 400 - він не високосний (`false`).
3. Всі інші роки, кратні 4, є високосними (`true`).

Цей алгоритм використовується масивом `daysInMonth`, який містить кількість днів для кожного з 12 місяців. Якщо поточний місяць - лютий (індекс 2), функція додає 1 день у разі істинності `isLeap(y)`.

Процес інкрементування у функції `addOneSecond()` відбувається каскадно: переповнення лічильника секунд скидає його в нуль і збільшує хвилини; переповнення хвилин збільшує години; переповнення 24 годин збільшує день. Якщо новий день перевищує значення, повернуте функцією `daysInMonth()`, день скидається на 1, а місяць збільшується.

3.5.2. Алгоритм динамічного зсуву часу та часових поясів

Унікальною особливістю розробленого пристрою є здатність самостійно адаптуватися до локального часу без втручання користувача. Глобальна система позиціонування видає час виключно у форматі UTC. Для автоматичного розрахунку часового поясу мікроконтролер використовує дані про географічну довготу (`Longitude`).

Оскільки кожен з 24 часових поясів Землі займає сектор шириною $360^\circ/24 = 15^\circ$, локальне зміщення обчислюється шляхом математичного округлення:

$$TimeZone = \text{round}\left(\frac{Longitude}{15.0}\right) \quad (3.3)$$

Найбільш критичним вузлом програмного забезпечення є функція `shiftRtcHours(int dh)`, яка застосовує знайдене зміщення до поточного часу. Просте додавання годин є недостатнім, оскільки зміщення може спричинити перехід через північ (зміну доби), що вимагає перерахунку дати як вперед, так і назад.

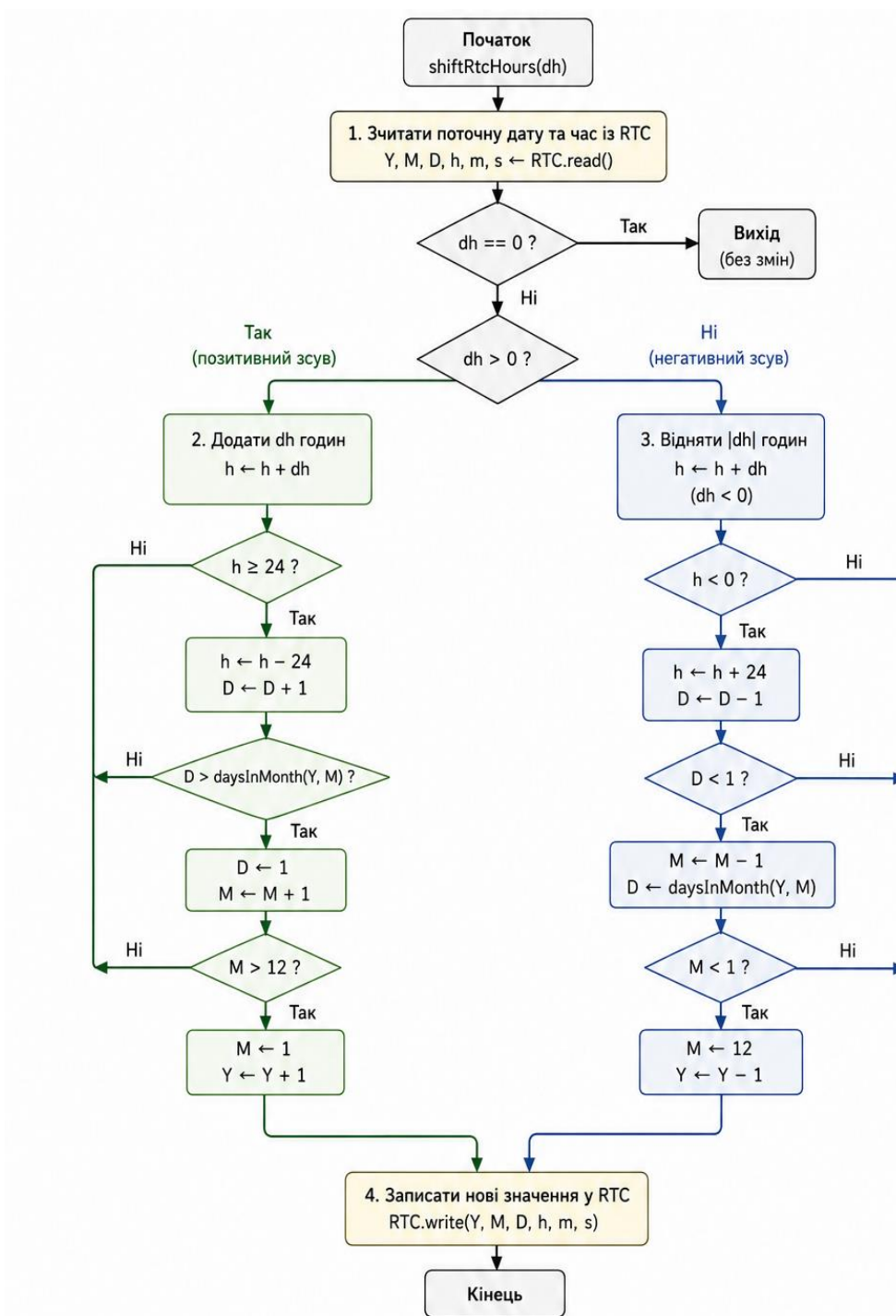


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму корекції часу та зміни часового поясу у функції

Алгоритм функції `shiftRtcHours` обробляє два випадки:

1. Негативний зсув ($dh < 0$): Якщо при відніманні годин значення стає меншим за 0, до годин додається 24, а лічильник днів декрементується. Якщо день стає нульовим, лічильник місяців зменшується. Якщо місяць стає нульовим - відбувається перехід на попередній рік (місяць стає 12-м), після чого день встановлюється рівним кількості днів у новому (попередньому) місяці з урахуванням високосного року.
2. Позитивний зсув ($dh > 0$): Якщо години перевищують 23, від них віднімається 24, а лічильник днів інкрементується. Далі відбувається перевірка перевищення максимальної кількості днів у поточному місяці. Якщо межа перевищена, день стає 1-м, а місяць інкрементується (з можливим переходом на наступний рік).

Такий рівень програмної реалізації дозволяє автономному годиннику коректно обробляти всі можливі крайові часові ситуації (наприклад, перехід назад через північ 1 січня у високосному році), забезпечуючи абсолютну надійність роботи системи без зовнішніх апаратних RTC-календарів.

3.6. Симуляція роботи пристрою у середовищі Proteus

Для перевірки правильності функціонування розробленого програмного забезпечення до етапу виготовлення фізичної друкованої плати, було проведено комп'ютерне моделювання (симуляцію) схеми у середовищі Proteus Design Suite.

У середовищі моделювання було зібрано спрощену принципову схему, що містить мікроконтролер ATmega168P, LCD-дисплей 1602 та інструмент «Virtual Terminal» для емуляції роботи GPS-приймача та моніторингу телеметрії. Схема симуляції наведена на рисунку 3.3.

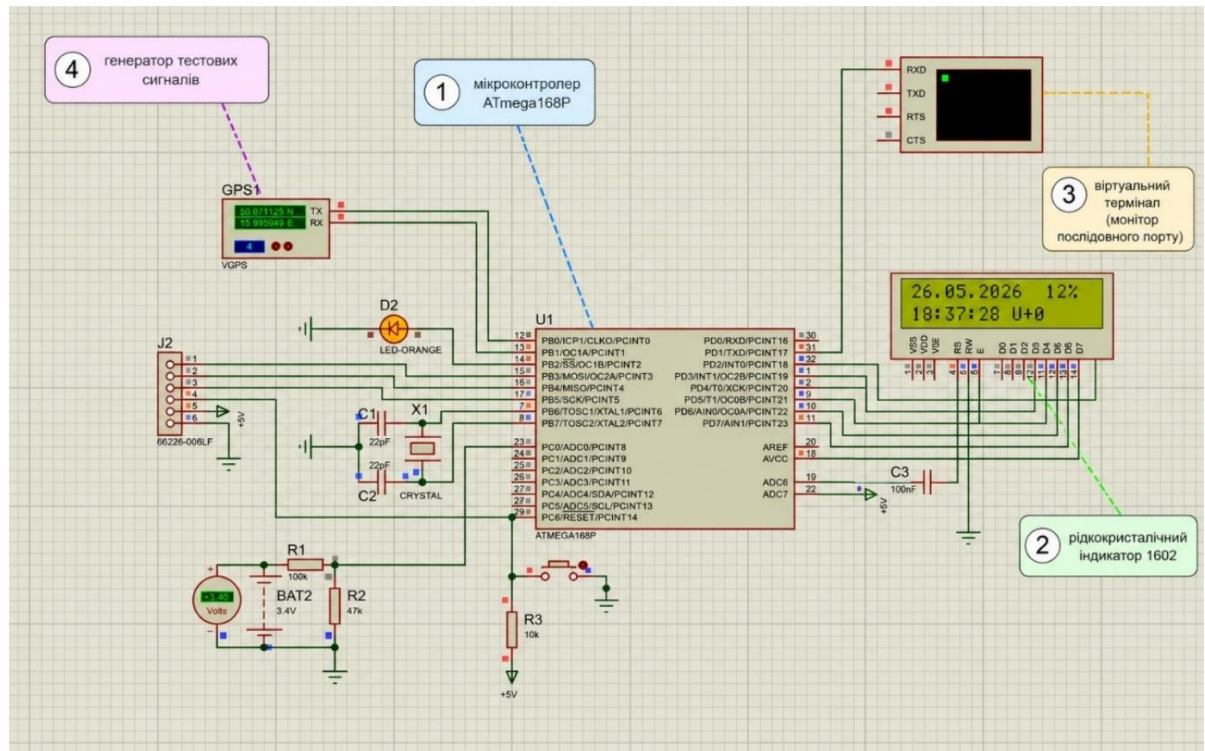


Рисунок 3.3 – Схема симуляції годинника у середовищі Proteus

У якості джерела NMEA-повідомлень використовувався тестовий файл або ручне введення рядків \$GPRMC через віртуальний термінал, підключений до портів програмного UART мікроконтролера. Процес обробки вхідних даних та реакція системи (результати симуляції) показані на рисунку 3.4.

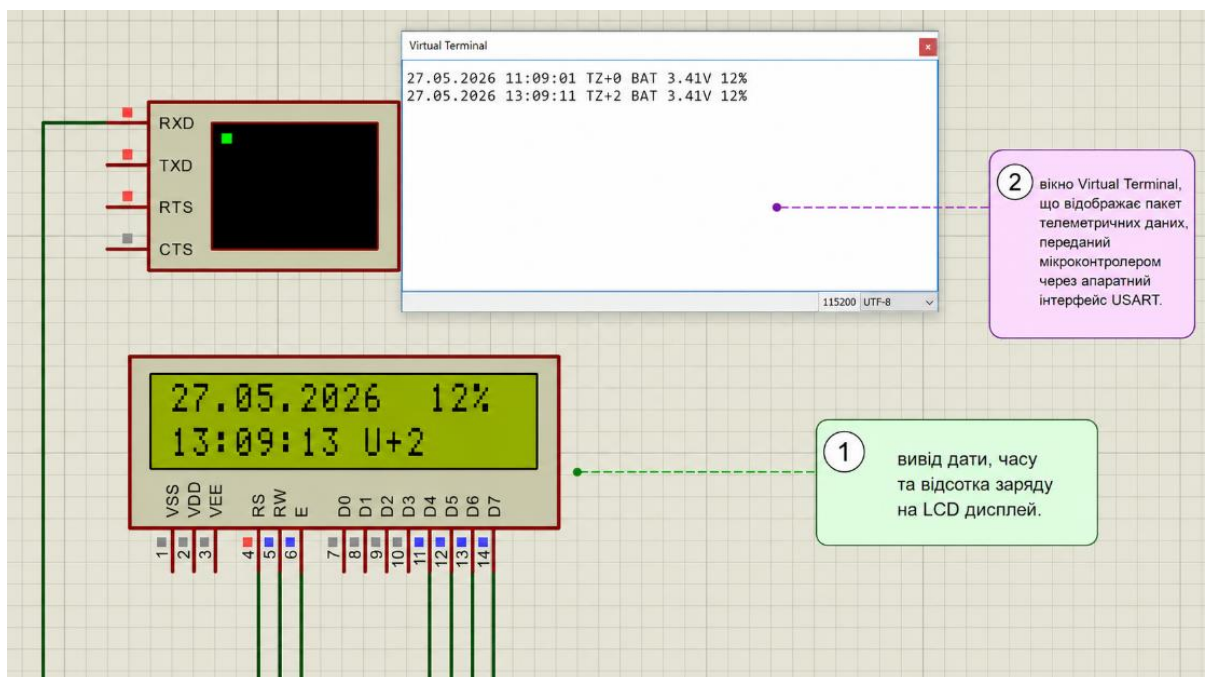


Рисунок 3.4 – Результати симуляції роботи пристрою та вивід телеметрії

- 1 - вивід дати, часу та відсотка заряду на LCD дисплей;
- 2 - вікно Virtual Terminal, що відображає пакет телеметричних даних, переданий мікроконтролером через апаратний інтерфейс USART.

Симуляція підтвердила повну працездатність алгоритмів: мікроконтролер коректно ініціалізує дисплей, успішно виконує парсинг NMEA-рядків, точно обчислює часовий пояс на основі заданих координат, правильно перераховує напругу АЦП та стабільно формує телеметричні пакети.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі було розроблено та досліджено програмне забезпечення керуючого мікроконтролера автономного годинника:

1. Створено загальний алгоритм роботи системи на базі неблокуючих процедур (через системний таймер `millis()`), що забезпечує паралельне виконання задач індикації, відліку часу та опитування периферії без зупинки основного циклу.
2. Реалізовано програмний годинник реального часу (RTC) з логікою каскадного інкрементування та врахуванням високосних років, який працює автономно у періоди між сеансами синхронізації.
3. Розроблено інтелектуальний алгоритм енергозбереження: система вмикає живлення GPS-модуля (апаратний вивід D10) лише на 2 хвилини кожні 24 години, що радикально знижує середнє енергоспоживання пристрою.
4. Впроваджено інноваційну функцію автоматичного розрахунку локального часового поясу шляхом математичного ділення довготи розташування (з навігаційних даних системи GPS) на ширину базового часового поясу (15 градусів), що позбавляє необхідності ручного налаштування часу.
5. Розроблено підсистему моніторингу акумулятора та формування телеметрії (час, дата, часовий пояс, напруга та відсоток заряду), яка періодично відправляється на зовнішній роз'єм UART.

6. Успішно проведено комп'ютерну симуляцію розробленого апаратно-програмного комплексу у середовищі Proteus, яка підтвердила правильність функціонування усіх підсистем та алгоритмів парсингу GPS-даних.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЮ

4.1. Дослідження енергоспоживання пристрою в різних режимах роботи

Оцінка енергоспоживання є критично важливим етапом проектування автономних мікропроцесорних систем. Оскільки розроблений годинник живиться від хімічного джерела струму (літій-іонного акумулятора) з обмеженою ємністю, час його автономної роботи безпосередньо залежить від сумарного струму, який споживають усі компоненти системи у кожен момент часу.

Для проведення точних розрахунків необхідно розділити роботу пристрою на два чітко виражені апаратні режими:

1. Режим очікування (Sleep / RTC Mode): основний стан пристрою, в якому GPS-модуль апаратно знеструмлений за допомогою транзисторного ключа нижнього рівня (Low-Side Switch), а мікроконтролер виконує відліки часу, оновлює інформацію на дисплеї (без використання фонові підсвітки) та відправляє дані по UART.
2. Режим синхронізації (Active / GPS Sync Mode): короткочасний стан, під час якого транзисторний ключ відкритий, на супутниковий приймач подається живлення, відбувається пошук супутників, прийом ефемерид та альманаху, а також парсинг NMEA-повідомлень.

Розглянемо енергетичний баланс для кожного з цих режимів. Сумарний струм споживання системи від акумулятора I_{bat} не дорівнює просто сумі струмів усіх компонентів, оскільки цифрова частина (5 В) живиться через підвищуючий імпульсний DC-DC перетворювач MT3608. Згідно з законом збереження енергії, струм, що споживається від акумулятора, обчислюється через потужність з урахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) перетворювача:

$$I_{bat} = \frac{I_{5V} \cdot V_{out}}{V_{bat} \cdot \eta} + I_q \quad (4.1)$$

де I_{5V} - сумарний струм навантаження на шині 5 В; $V_{out} = 5.0$ - вихідна напруга перетворювача; V_{bat} - поточна напруга акумулятора (для розрахунків приймаємо середнє значення $V_{bat} = 3.7$); η - ККД перетворювача МТ3608 (за специфікацією при струмах 50-100 мА становить близько 0.85 або 85%); I_q - власний струм спокою перетворювача в режимі холостого ходу (близько 0.2 мА).
Аналіз струмів на шині 5 В (I_{5V}):

- Мікроконтролер АТmega168Р на частоті 16 МГц в активному режимі (Active mode): $I_{mcu} \approx 12.0$ мА.
- Рідкокристалічний дисплей LCD 1602А (лише логічна частина, підсвітка не використовується): $I_{mcu} \approx 12.0$ мА.
- Струм дільника напруги АЦП: $I_{adc} = V_{bat} / (100\text{кОм} + 47\text{кОм}) \approx 0.025$ мА (цим струмом у загальному балансі можна знехтувати).
- GPS-модуль NEO-6М (у режимі захоплення / Acquisition): $I_{gps_acq} \approx 55.0$.
- GPS-модуль (у режимі стеження / Tracking): $I_{gps_trk} \approx 35.0$ мА.

Підставимо ці значення для визначення навантаження у різних режимах:

Режим очікування (GPS вимкнено):

$$I_{5V_sleep} = I_{mcu} + I_{lcd_logic} = 12.0 + 1.5 = 13.5 \text{ мА} \quad (4.2)$$

Струм, який відбирається від акумулятора (3.7 В) у режимі очікування:

$$I_{bat_sleep} = \frac{13.5\text{мА} \cdot 5.0\text{В}}{3.7\text{В} \cdot 0.85} + 0.2\text{мА} = \frac{67.5}{3.145} + 0.2 = 21.66\text{мА}$$

Режим синхронізації (GPS увімкнено, середнє споживання): Оскільки процес синхронізації (пошуку супутників) потребує підвищеного струму, додаємо струм $I_{gps_acq} = 55$ мА.

$$I_{5v_sync} = 13.5\text{mA} + 55.0\text{mA} = 68.5\text{mA}$$

Струм, який відбирається від акумулятора під час синхронізації:

$$I_{bat_sync} = \frac{68.5\text{mA} \cdot 5.0\text{V}}{3.7\text{V} \cdot 0.85} + 0.2\text{mA} = \frac{342.5}{3.145} + 0.2 = 109.1\text{mA}$$

Зведена таблиця струмів наведена нижче.

Таблиця 4.1.- Енергоспоживання пристрою в розрізі компонентів та режимів роботи

Вузол / Режим роботи	Споживаний струм на шині 5В, мА	Струм навантаження акумулятора (3.7В), мА
Режим очікування (Sleep Mode)	1.3	~21.7
Мікроконтролер (16 МГц)	12.0	~19.3
– LCD дисплей (без підсвітки)	1.5	~2.4
Режим синхронізації (Sync Mode)	68.5	~109.1
– Мікроконтролер (16 МГц)	12.0	~19.3
– LCD дисплей (без підсвітки)	1.5	~2.4
– GPS-модуль NEO-6M	55.0	~87.4

Як видно з розрахунків, відсутність енергоємної фонові підсвітки дисплея та наявність транзисторного ключа для GPS дозволяють утримувати струм

споживання в режимі очікування на дуже низькому рівні (близько 21.7 мА від акумулятора).

4.2. Розрахунок часу автономної роботи від акумулятора 18650

Використовуючи отримані струмові характеристики, можна розрахувати загальний час автономної роботи пристрою. В якості джерела живлення обрано стандартний промисловий літій-іонний акумулятор формату 18650 номінальною ємністю $C_{bat} = 2500 \text{ мА} \cdot \text{год (мАг)}$.

Оскільки пристрій працює у циклічному імпульсному режимі споживання, розрахунок загального часу роботи необхідно проводити з використанням поняття еквівалентного середнього струму споживання (I_{avg}). Цей струм обчислюється як зважене за часом значення струмів у всіх режимах на одному повному циклі роботи.

Алгоритм програмного забезпечення (див. розділ 3) передбачає наступний цикл (період) роботи:

- Загальний період циклу: $T_{cycle} = \text{SYNC_PERIOD_MS} = 24 \text{ години} = 1440 \text{ хвилин}$.
- Час активного стану (вікно синхронізації): $T_{sync} = \text{SYNC_WINDOW_MS} = 2 \text{ хвилини}$.
- Час стану очікування: $T_{sleep} = T_{cycle} - T_{sync} = 1440 - 2 = 1438 \text{ хвилин}$.

Визначимо середній споживаний струм:

$$I_{avg} = \frac{I_{bat_sync} \cdot T_{sync} + I_{bat_sleep} \cdot T_{sleep}}{T_{cycle}} \quad (4.3)$$

Підставляємо розраховані раніше значення струмів від акумулятора:

$$I_{avg} = \frac{109.1 \text{ мА} \cdot 2 \text{ хв} + 21.66 \text{ мА} \cdot 1438 \text{ хв}}{1440 \text{ хв}}$$

$$I_{avg} = \frac{218.2 + 31147.1}{1440} = \frac{31365.3}{1440} \approx 21.78 \text{ мА}$$

Оскільки час роботи GPS дуже малий порівняно із загальним циклом (2 хвилини на добу), його енергетичний внесок у загальний бюджет є мінімальним. Середній струм системи становить приблизно 21.78 мА.

Знаючи ємність акумулятора та середній струм, обчислимо теоретичний час автономної роботи (T_{work}) у годинах:

$$T_{work} = \frac{C_{bat}}{I_{avg}} = \frac{2500 \text{ мА} \cdot \text{год}}{21.78 \text{ мА}} \approx 114.78 \text{ годин}$$

Переведемо цей час у доби:

$$T_{days} = \frac{114.78}{24} \approx 4.78 \text{ доби}$$

Додаткові фактори, що впливають на автономність: На практиці літій-іонні акумулятори не можуть віддавати 100% своєї ємності без деградації хімічного складу. Система захисту на базі DW01 відключить навантаження при падінні напруги до 2.4 В (в реальності ефективна віддача струму для 5-вольтового перетворювача завершується на позначці близько 3.0 В). Враховуючи коефіцієнт корисної ємності акумулятора (близько 0.9), практичний час автономної роботи розробленого годинника від акумулятора 2500 мА·год складе:

$$T_{real} = T_{work} \cdot 0.9 = 114.78 \cdot 0.9 \approx 103.3 \text{ годин} . \quad (4.4)$$

Для подальшого збільшення часу автономної роботи у майбутніх модифікаціях доцільно впровадити переведення обчислювального ядра мікроконтролера ATmega168P у режим глибокого сну (Power-save mode) у проміжках між оновленням екрана. Оскільки зараз мікроконтролер споживає 12 мА (більшу частину енергії в режимі очікування), використання апаратних режимів енергозбереження дозволить зменшити струм споживання ще в кілька разів і досягти автономності на рівні кількох тижнів.

4.3. Оцінка часу «холодного» та «гарячого» старту GPS-модуля

Для оцінки правильності вибору ширини вікна синхронізації (SYNC_WINDOW_MS = 2 хвилини), необхідно дослідити часові характеристики запуску супутникового приймача. У технології GNSS існує поняття Time To First Fix (TTFF) - час до першого визначення місцеположення та часу. Він залежить від наявності у пам'яті модуля актуальних даних про орбіти супутників.

Існує три основні режими старту GPS-приймача:

1. Холодний старт (Cold Start): Найтриваліший режим. Виникає, коли модуль вмикається вперше, або коли він був повністю знеструмлений (включно із батареєю резервного живлення V_BCKP, якщо вона відсутня на модулі), і всі дані в його оперативній пам'яті (RAM) втрачені. Приймач повинен просканувати весь частотний діапазон, знайти супутники та завантажити альманахи (грубі координати всіх супутників системи) і ефемериди (точні орбіти знайдених супутників). Швидкість передачі навігаційного повідомлення від супутника становить всього 50 біт/с. За специфікацією модуля NEO-6M, час холодного старту в умовах відкритого неба становить від 27 до 35 секунд.
2. Теплий старт (Warm Start): Виникає, коли приймач пам'ятає альманахи і поточний час (якщо на модулі встановлено іоністор або батареяка RTC), але ефемериди застаріли (їх термін дії - близько 2-4 годин). Приймачу потрібно завантажити лише нові ефемериди, що займає близько 26 секунд.

3. Гарячий старт (Hot Start): Виникає, якщо приймач був вимкнений на короткий час, і всі дані (альманах, ефемериди, час) є актуальними. У такому разі захоплення сигналу і розв'язання задачі трилатерації займає всього 1 секунду.

У розробленому пристрої транзисторний ключ (Low-Side) повністю знеструмлює модуль. Якщо на платі модуля NEO-6М немає власної резервної батарейки живлення RTC-пам'яті (або вона розряджена), то кожне включення раз на 24 години буде холодним стартом.

Оскільки в ідеальних умовах холодний старт триває ~ 35 секунд, а в умовах щільної міської забудови або хмарності рівень сигналу C/N_0 падає, завантаження ефемерид може перериватися і починатися знову. З огляду на це, виділене програмним алгоритмом вікно синхронізації у 120 секунд (2 хвилини) є технічно обґрунтованим. Воно надає трикратний запас часу ($35\text{с} \cdot 3 \approx 105\text{с}$) для успішного отримання валідної позначки часу навіть за несприятливих погодних умов, запобігаючи нескінченному пошуку супутників та перевитраті енергії акумулятора.

4.4. Аналіз похибки та точності ходу годинника в умовах втрати GPS-сигналу

Оскільки еталонна GPS-синхронізація відбувається лише раз на 24 години, протягом решти часу (1438 хвилин на добу) годинник функціонує в автономному режимі. Відлік секунд у цьому режимі підтримується програмно на базі переривань таймера та зовнішнього кварцового резонатора на 16 МГц. Тому необхідно математично оцінити похибку відліку часу, яка накопичиться за період між двома сеансами зв'язку з супутником.

Відносна нестабільність частоти типового кварцового резонатора широкого вжитку (АТ-зрізу) задається у мільйонних частках (parts per million, ppm). Для бюджетних кристалів номінальна похибка становить:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_0} = \pm 30 \text{ppm} = \pm 30 \cdot 10^{-6} \quad (4.5)$$

Абсолютна похибка відліку часу ΔT накопичується лінійно і розраховується за формулою:

$$\Delta T = T_{aut} \cdot \delta \quad (4.6)$$

де T_{aut} - час автономної роботи.

Розрахуємо максимальне відхилення годинника за період 24 години ($T_{aut} = 24 \text{ год} = 86400 \text{ секунд}$):

$$\Delta T_{24} = 86400 \text{с} \cdot (\pm 30 \cdot 10^{-6}) = \pm 2.592 \text{ секунди}$$

Таким чином, за добу ізольованої роботи (до наступного увімкнення GPS) локальний час мікроконтролера в найгіршому випадку «втече» трохи більше ніж на 2.5 секунди.

З інженерної точки зору, похибка у 2.5 секунди є абсолютно непомітною для людського сприйняття та цілком прийнятною для побутового годинника. Коли через 24 години транзистор увімкне модуль NEO-6M, алгоритм отримає нове речення \$GPRMC і підпрограма setRtcFromGpsUTC_noTZ() миттєво перезапише змінні годин, хвилин та секунд у програмному RTC, обнуливши цю похибку.

Це доводить високу ефективність спроектованої гібридної архітектури: пристрій забезпечує довгострокову (річну) точність на рівні атомних стандартів частоти, не маючи при цьому наддорогого термокомпенсованого апаратного модуля (ТСХО) на борту та економлячи значні обсяги енергії.

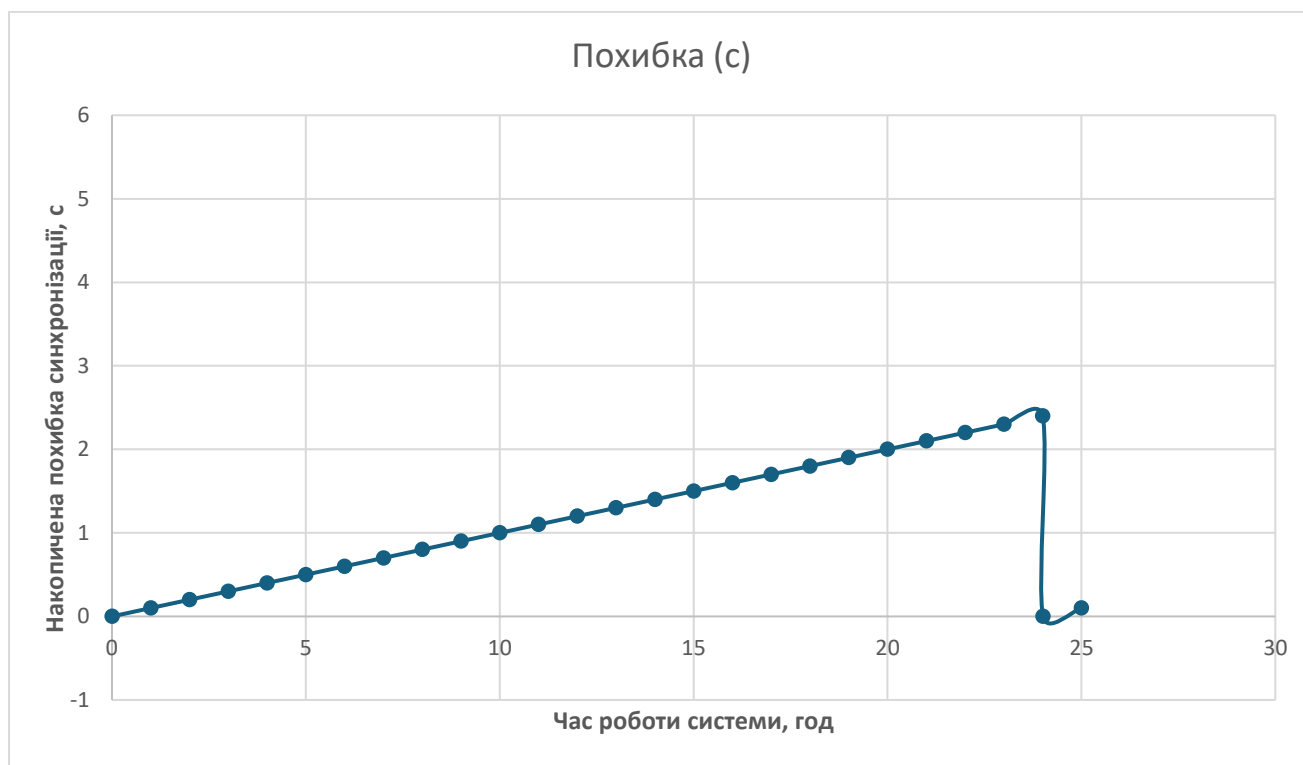


Рисунок 4.1 – Графік накопичення та скидання часової похибки пристрою

4.5. Аналіз точності вимірювання напруги та профілю розряду акумулятора

У розробленому програмному забезпеченні реалізовано алгоритм моніторингу стану літій-іонного акумулятора. Програмна функція `readBattery()` перетворює сирі значення АЦП у рівень напруги, а потім - у залишковий відсоток заряду за допомогою лінійної апроксимації:

$$Battery(\%) = \frac{V_{bat} - 3.3}{4.2 - 3.3} \cdot 100 \quad (4.7)$$

де V_{bat} - розрахована напруга на клеммах акумулятора; 4.2 В - напруга повністю зарядженого елемента; 3.3 В - умовна межа повного розряду, нижче якої пристрій сигналізує про 0% заряду.

Для оцінки достовірності цих телеметричних даних необхідно провести аналіз інструментальної та методичної похибок вимірювального тракту.

4.5.1. Аналіз інструментальної похибки дільника напруги та АЦП

Абсолютна похибка вимірювання напруги ($V_{ref} = 5.0$) формується з трьох основних складових: похибки квантування АЦП, похибки опорної напруги та похибки номіналів резисторів дільника напруги.

Напруга обчислюється за формулою:

$$V_{bat} = ADC \cdot \frac{V_{ref}}{1023} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (4.8)$$

де ADC - цифрове значення з перетворювача; $V_{ref} = 5.0$ В - опорна напруга, що формується перетворювачем МТ3608; $R_1 = 100$ кОм та $R_2 = 47$ кОм.

1. Похибка квантування: 10-бітний АЦП мікроконтролера АТmega168Р має крок квантування $q = 5.0/1024 \approx 4.88$ мВ. З урахуванням коефіцієнта дільника ($K = 147/47 \approx 3.127$), абсолютна похибка квантування, зведена до входу дільника, становить $\Delta V_q = \pm 15.2$ мВ.
2. Похибка опорної напруги: Імпульсний перетворювач МТ3608 забезпечує точність вихідної напруги на рівні $\pm 2\%$. Таким чином, відхилення опорної напруги може становити $\Delta V_{ref} = \pm 0.1$ В.
3. Похибка резисторів: Використання стандартних SMD-резисторів із допуском $\delta R = \pm 1\%$ вносить відносну похибку в коефіцієнт передачі дільника. Максимальна відносна похибка дільника (δK) при найгіршому збігу відхилень розраховується як:

$$\delta K \approx \delta R_1 + \delta R_2 = 1\% + 1\% = 2\% \quad (4.9)$$

Зведемо всі складові до максимальної абсолютної інструментальної похибки при вимірюванні напруги повністю зарядженого акумулятора (4.2 В):

$$\Delta V_{max} = V_{bat} \cdot (\delta V_{ref} + \delta K) + \Delta V_q \approx \pm 0.183 \text{ В} \quad (4.10)$$

Отже, у найгіршому випадку (коли всі допуски компонентів відхиляються в одну сторону), похибка вимірювання напруги може досягати $\pm 0.18 \text{ В}$. На практиці, за умови використання прецизійних резисторів та калібрування константи V_{ref} у програмному коді під реальну напругу DC-DC перетворювача, цю похибку можна зменшити до $\pm 0.05 \text{ В}$.

4.5.2. Дослідження нелінійності розрядного профілю Li-ion акумулятора

Другим фактором, що впливає на точність відображення відсотка заряду, є методична похибка лінійної апроксимації. У програмному забезпеченні залежність ємності від напруги прийнята як лінійна (рівняння прямої від 3.3 В до 4.2 В).

Проте реальна крива розряду хімічного джерела струму на основі Li-ion технології має яскраво виражений нелінійний характер (S-подібну криву). Експериментальні дослідження розряду типових акумуляторів 18650 малим струмом показують наступні етапи:

1. Етап експоненційного спаду (100% – 90%): Напруга швидко падає з 4.2 В до 4.0 В протягом перших 10% відданої ємності.
2. Етап плато (90% – 20%): Основна робоча зона. Напруга повільно і практично лінійно знижується від 4.0 В до 3.6 В. На цей етап припадає віддача близько 70% загальної енергії акумулятора.
3. Етап глибокого розряду (20% – 0%): Після проходження порогу 3.5 В напруга починає стрімко падати аж до спрацьовування системи захисту (2.4 В – 3.0 В).

Через цю нелінійність лінійна формула у кодї створює ефект "швидкого падіння" на початку та в кінці розряду, але на робочому плато (наприклад, при напрузі 3.8 В) формула покаже $(3.8 - 3.3)/0.9 \cdot 100 \approx 55\%$, що досить близько до реальної залишкової ємності (близько 60%).

Таким чином, використання спрощеної лінійної моделі в автономному годиннику є виправданим компромісом. Вона не перевантажує обчислювальне ядро мікроконтролера складними поліноміальними розрахунками чи масивами таблиць відповідності (Look-up Tables), але при цьому виконує свою головну функцію - своєчасно попереджає користувача про наближення критичного рівня розряду (нижче 3.4 В) для запобігання раптовому вимкненню пристрою.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У дослідницькому розділі було проведено комплексний розрахунок техніко-експлуатаційних показників розробленого автономного годинника:

1. Складено енергетичний баланс системи для активного режиму (109.1 мА) та режиму очікування (21.7 мА) з урахуванням втрат на перетворення енергії у DC-DC модулі MT3608.
2. Математично доведено ефективність транзисторного керування живленням: оскільки вікно синхронізації становить лише 2 хвилини на добу, середній споживаний струм становить 21.78 мА, що гарантує безперервну роботу пристрою від стандартного акумулятора 18650 (2500 мА·год) протягом понад 4 діб без використання підсвітки дисплея.
3. Проаналізовано режими старту супутникового модуля. Обґрунтовано вибір двовилинного (120 с) вікна очікування супутників, яке забезпечує трикратний запас часу для гарантованого «холодного старту» і отримання актуальних ефемерид навіть за умов часткової перекритості небосхилу.
4. Проведено розрахунок відносної та абсолютної похибки програмного годинника на базі 16 МГц кварцового резонатора. Доведено, що

накопичена за 24 години похибка не перевищує 2.6 секунди, яка потім повністю компенсується щоденною синхронізацією. Це підтверджує досягнення головної мети роботи: забезпечення високої довгострокової точності при збереженні оптимального енергоспоживання.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи було спроектовано, досліджено та підготовлено до апаратної реалізації автономний електронний годинник із функцією точної синхронізації часу за сигналами глобальної супутникової системи позиціонування GPS. Поставлена мета роботи та всі окреслені завдання були виконані в повному обсязі.

В ході проєктування було отримано наступні результати:

1. Проведено аналіз існуючих методів вимірювання та синхронізації часу. Доведено, що використання супутникових систем дозволяє досягти еталонної точності без необхідності підключення до мережі Інтернет (NTP-протоколів) і без накопичення довгострокового дрейфу, властивого класичним мікросхемам RTC.
2. Розроблено апаратну архітектуру пристрою. Спроектовано принципову електричну схему на базі мікроконтролера ATmega168P, зовнішнього кварцового генератора на 16 МГц, рідкокристалічного індикатора 1602A та GPS-модуля NEO-6M. Розведено підсистему живлення на базі модуля заряду TP4056 із захистом акумулятора DW01 та підвищуючого перетворювача MT3608 для стабільної роботи 5-вольтової логіки.
3. Імплементовано інноваційну систему енергозбереження. Для вирішення проблеми високого струму споживання GPS-приймача впроваджено апаратний транзисторний ключ нижнього рівня (Low-Side Switch) у колі заземлення модуля. Це дозволило повністю знеструмлювати приймач апаратним шляхом. Програмний автомат станів активує приймач лише на 2 хвилини кожні 24 години, що скорочує вплив GPS-модуля на загальне споживання пристрою до мізерних 0.12 мА в еквіваленті середнього струму.
4. Розроблено високонадійне програмне забезпечення. Код мікроконтролера побудовано на неблокуючих алгоритмах (на основі функції `millis()`), що

дозволило паралельно виконувати парсинг NMEA-повідомлень, інкрементування програмного RTC та виведення даних. Реалізовано алгоритм автоматичного розрахунку локального часового поясу (шляхом ділення географічної довготи на 15 градусів) та динамічного підлаштування часу, що робить пристрій універсальним для використання в будь-якій точці світу.

5. Створено інтерфейс телеметрії. Пристрій обладнано комунікаційним портом UART, через який у зовнішню систему з періодичністю у 10 секунд транслюється повний пакет даних: час, поточна дата, часовий пояс, а також напруга акумулятора та розрахований відсоток заряду, що вимірюється через АЦП.
6. Виконано симуляцію та математичне моделювання. Працездатність системи підтверджено у середовищі моделювання Proteus. Проведені енергетичні розрахунки довели, що пристрій здатний працювати понад 103 години (понад 4 доби) від одного заряду типового акумулятора 18650 ємністю 2500 мА·год, при цьому накопичена за добу похибка точності в межах 2,6 секунди повністю обнуляється при плановому сеансі зв'язку.

Спроектований пристрій є економічно доцільним, технічно надійним і може використовуватися як базова платформа для створення високоточних реєстраторів даних, метеостанцій або як самостійний портативний еталон часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Новацький А. О. Проектування мікропроцесорних систем. Розділ «Програмування мікроконтролерів родини AVR» [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. напряму підготов. 6.050201 «Системна інженерія» / уклад. А. О. Новацький. – Електронні текстові дані. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 109 с. – Режим доступу: <https://ist.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/05/%D0%9F%D0%9E%D0%A1%D0%86%D0%91%D0%9D%D0%98%D0%9A-%D0%9F%D0%A0%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%9C%D0%A3%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%9D%D0%AF-AVR.pdf> (дата звернення: 28.05.2026).
2. Kaplan E. D. Understanding GPS: Principles and Applications [Електронний ресурс] : монографія / E. D. Kaplan, C. J. Hegarty. – 2nd ed. – Електронні текстові дані. – Norwood : Artech House, 2006. – 726 р. – Режим доступу: https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_33/ourdev_584835O21W59.pdf (дата звернення: 28.05.2026).
3. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P Microcontroller Datasheet [Електронний ресурс] : технічна специфікація / Microchip Technology Inc. – Електронні текстові дані. – Chandler : Microchip, 2020. – 660 р. – Режим доступу: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf> (дата звернення: 20.05.2026).
4. NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet [Електронний ресурс] : технічна документація / u-blox AG. – Електронні текстові дані. – Thalwil : u-blox, 2011. – 25 р. – Режим доступу: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf (дата звернення: 21.05.2026).
5. NMEA 0183 Standard for Interfacing Marine Electronic Devices [Електронний ресурс] : галузевий стандарт / National Marine Electronics Association. – Version 4.10. – Електронні текстові дані. – Severna Park : NMEA, 2012. – 120 р. – Режим

доступу: https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183_Standard (дата звернення: 22.05.2026).

6. TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger [Електронний ресурс] : технічна специфікація / UMW (Youtai Semiconductor). – Електронні текстові дані.

– Режим доступу: <https://www.umw-ic.com/static/pdf/493f603e988f83ce21e556bca0c516fd.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

7. MT3608 1.2MHz 2A Step Up Converter [Електронний ресурс] : технічна специфікація / Aerosemi Technology Co., Ltd. – Електронні текстові дані. – Shenzhen : Aerosemi, 2015. – 6 р. – Режим доступу: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf> (дата звернення: 20.05.2026).

8. DW01-P One Cell Lithium-ion/Polymer Battery Protection IC [Електронний ресурс] : технічна документація / Fortune Semiconductor Corporation. – Електронні текстові дані. – Taipei : Fortune, 2013. – 12 р. – Режим доступу: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/2/5/1/DW01-P_DataSheet_V10.pdf (дата звернення: 23.05.2026).

9. FS8205A MOSFET Transistor Datasheet and Characteristics [Електронний ресурс] : технічний довідник / AllTransistors Database. – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://alltransistors.com/mosfet/transistor.php?transistor=22216> (дата звернення: 27.05.2026).

10. HD44780U (LCD-II) Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver [Електронний ресурс] : технічна специфікація / Hitachi. – Електронні текстові дані. – Tokyo : Hitachi, 1999. – 60 р. – Режим доступу: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf> (дата звернення: 21.05.2026).

11. LiquidCrystal Library Documentation [Електронний ресурс] : офіційна документація / Arduino LLC. – Електронні текстові дані. – 2024. – Режим доступу:

<https://docs.arduino.cc/learn/built-in-libraries/liquidcrystal/> (дата звернення: 24.05.2026).

12. KiCad EDA Software Documentation [Електронний ресурс] : офіційна документація / KiCad Developers Team. – Електронні текстові дані. – 2024. – Режим доступу: <https://docs.kicad.org/> (дата звернення: 27.05.2026).

13. Співак В. М. Основи силової електроніки [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. електротехн. спец. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. В. М. Співак. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 285 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c6e9d089-502d-4358-b48f-61ac262f72fd/content> (дата звернення: 24.05.2026).

14. Linden D. Handbook of Batteries / D. Linden, T. B. Reddy. – 3rd ed. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 1200 p.

15. SoftwareSerial Library Documentation [Електронний ресурс] : офіційна документація / Arduino LLC. – Електронні текстові дані. – 2024. – Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/learn/built-in-libraries/software-serial/> (дата звернення: 25.05.2026).

16. Lombardi M. A. Fundamentals of Time and Frequency [Електронний ресурс] : технічний посібник / М. А. Lombardi. – Електронні текстові дані. – Boulder : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2002. – 55 p. – Режим доступу: <https://tf.nist.gov/general/pdf/1498.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).

17. Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering [Електронний ресурс] : монографія / Н. W. Ott. – Електронні текстові дані. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2009. – 872 p. – Режим доступу: <https://daskalakispiros.com/files/Ebooks/Electromagnetic%20Compatibility%20Engineering.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

18. Proteus VSM Tutorials [Електронний ресурс] : офіційний навчальний посібник / Labcenter Electronics Ltd. – Електронні текстові дані. – Grassington : Labcenter Electronics. – Режим доступу:

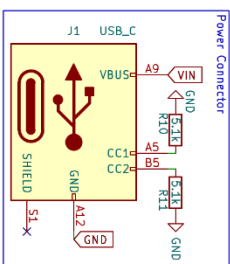
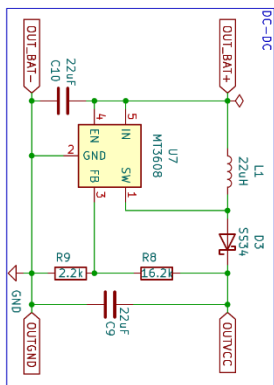
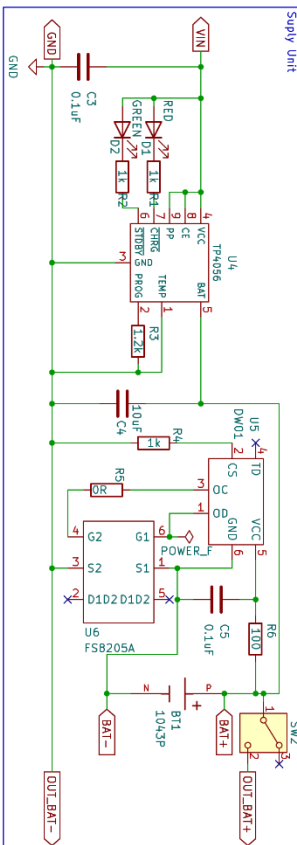
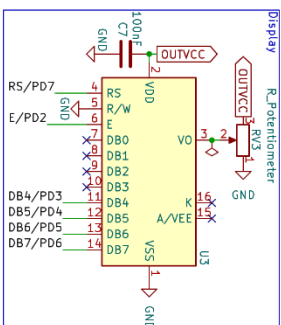
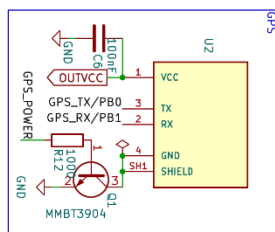
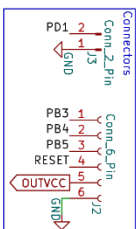
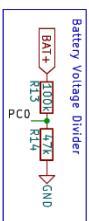
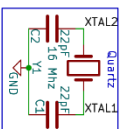
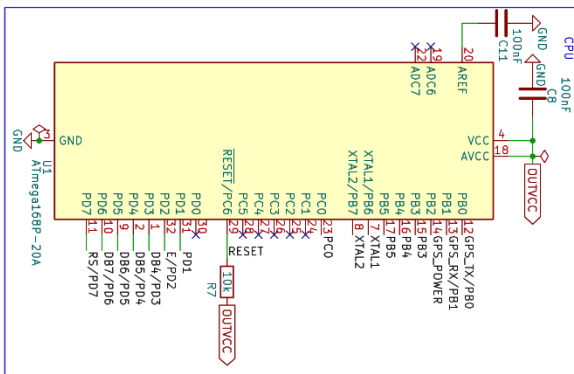
https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/Tutorials_p9.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

19. Hart M. TinyGPS++ Library Documentation [Електронний ресурс] : офіційна документація / М. Hart. – Електронні текстові дані. – 2013. – Режим доступу: <https://docs.particle.io/reference/device-os/libraries/t/TinyGPS++/> (дата звернення: 25.05.2026).

20. AVR Libc Reference Manual [Електронний ресурс] : офіційна документація / The AVR Libc Developers. – Електронні текстові дані. – 2024. – Режим доступу: <https://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/> (дата звернення: 26.05.2026).

Додаток А. Принципова схема

Інв.№об.	Підпис і дата	Зам.інв.№	Інв.№дубл.	Підпис і дата



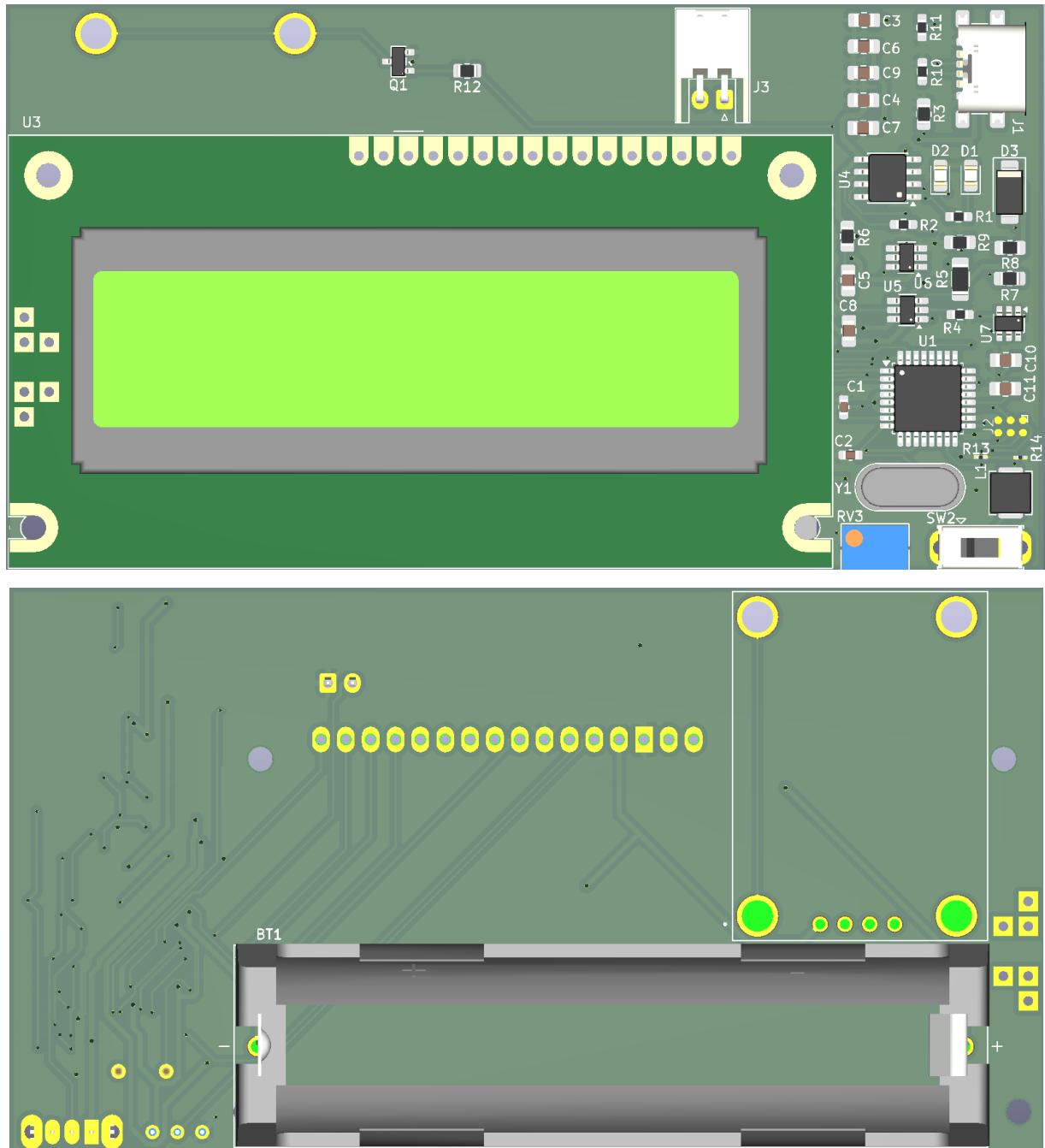
Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Возроб.	Дзюба Г. Б.		
Перевір.			
Г.контр.			
Н.контр.			
Затверд.			

МЕ.ДП.ДП2105.002ЕЗ			
Автономний годинник з синхронізацією GPS			
Літера		Маса	Масштаб
Аркуш 1	Аркуші		
1	1		
ФЕЛ НТУУ			

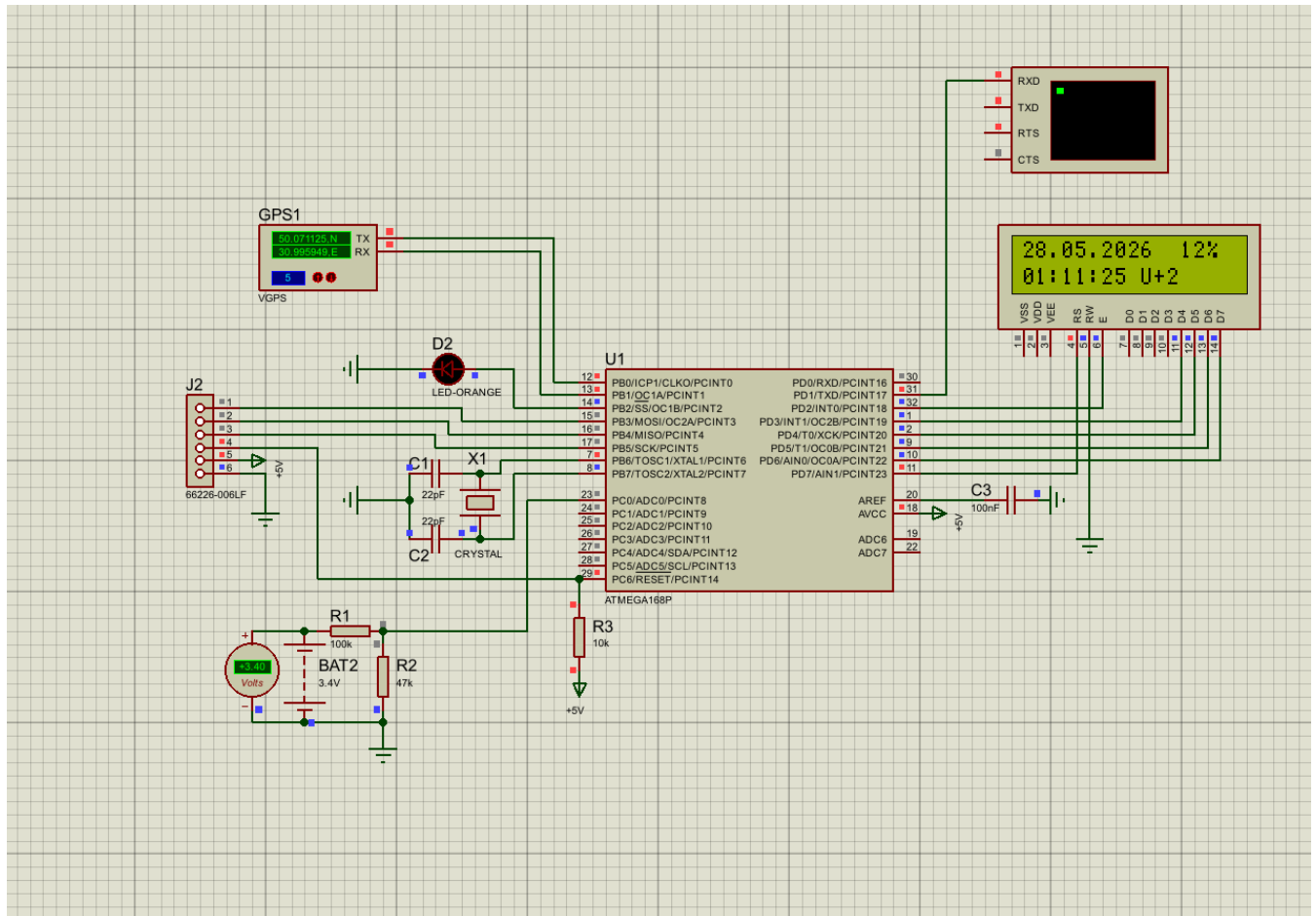
Копировать

Формат А4

Додаток В. Вигляд друкованої плати в 3D



Додаток Г. Результати моделювання роботи пристрою в середовищі Proteus



Додаток Г. Перелік компонентів

Позначення	Найменування	К-сть	Примітка
Мікросхеми та модулі			
U1	ATmega168P-20A	1	TQFP-32
U2	ZC323200 (GY-NEO6MV2 GPS Module)	1	Module
U3	RC1602A LCD 16×2	1	THT, 16-pin
U4	TP4056	1	SOIC-8-EP
U5	DW01	1	SOT-23-6
U6	FS8205A	1	SOT-23-6
U7	MT3608	1	SOT-23-6
Пасивні елементи та напівпровідники			
Y1	Кварцовий резонатор 16 MHz	1	HC-49
D3	Діод Шоттки SS34	1	SMA
L1	Індуктивність 22 μ H	1	APH0420
D1	Світлодіод червоний	1	805
D2	Світлодіод зелений	1	805
Q1	Транзистор MMBT3904	1	SOT-23
Механіка та роз'єми			
BT1	Тримач акумулятора 18650	1	THT
J1	USB Type-C 6-pin	1	SMD
J2	Роз'єм 1×06	1	Header
J3	Роз'єм JST XH 1×02	1	THT
SW2	Перемикач повзунковий	1	THT
RV3	Підлаштувальний резистор	1	3266Y
Конденсатори			
C1, C2	22 pF	2	603
C3, C5, C6, C7, C8, C11	100 nF	6	805
C4	10 μ F	1	805
C9, C10	22 μ F	2	805
Резистори			
R1, R2, R4	1 k Ω	3	603
R10, R11	5.1 k Ω	2	603
R3	1.2 k Ω	1	805
R6	100 Ω	1	805
R7	10 k Ω	1	805
R8	16.2 k Ω	1	805
R9	2.2 k Ω	1	805
R12	1 k Ω	1	805
R13	100 k Ω	1	603
R14	47 k Ω	1	603
R5	0 Ω	1	1206